

Studijní program B2341 - Strojírenství

Studijní obor: 2302R022 Stroje a zařízení

Zaměření: Sklářské stroje

Adaptivní chapadlo s poddajnými úchopnými prvky

(Adaptive gripper with compliant gripping units)

KSR –

Tomáš Mikan

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. František Novotný, CSc.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Marcel Horák, Ph.D.

Rozsah bakalářské práce:

Počet stran: 60
Počet tabulek: 4
Počet obrázků: 57
Počet výkresů: 20
Počet příloh: 0
Počet modelů: 0

Datum odevzdání: 25. 5. 2012



Adaptivní chapadlo s poddajnými úchopnými prvky

Anotace

Předmětem předkládané bakalářské práce je prozkoumání možností tvarově poddajného uchopování. Na základě rešerše se práce zabývá návrhem koncepčního řešení tvarově poddajných úchopných prvků a návrhem jeho konstrukčního řešení, které bude možno aplikovat pro komerčně dodávaná chapadla různých typů. Součástí práce je také navržení testovacího zařízení a ověření funkčnosti navrhovaného řešení.

Adaptive gripper with compliant gripping units

Annotation

The bachelor degree thesis is focused on thorough analysis of present state of compliant grippers. Based on the research thesis comes up with a concept solution of the gripping units which are able to adapt its shape and also focuses on a construction solution which can be applied to various types of commercial grippers. Part of the thesis is also design of testing device and verifying the function of the solution.

Klíčová slova: Robotika, adaptivní, universální, přizpůsobivé, chapadlo, uchopování, tvarově přizpůsobivé čelisti, magneto, elektro reologická kapalina, adaptivní vakuový systém, polymery s tvarovou pamětí

Key words: Robotic, adaptive, versatile, universal, conformable, compliant gripper, gripping, grasping, shape adaptive jaws, jamming, electrorheological, magnetorheological fluid gripper, shape memory polymers

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 25. 5. 2012

.....

podpis

Poděkování

Děkuji panu **doc. Ing. Františku Novotnému, CSc.**, vedoucímu mé bakalářské práce a **Ing. Marcelovi Horákovi, Ph.D.**, mému konzultantovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky a čas, který mi věnovali v průběhu řešení této bakalářské práce.

Poděkoval bych také rád své rodině za podporu během studií.

Tomáš Mikan

Seznam zkratek a symbolů

<i>Označení</i>	<i>Jednotky</i>	<i>Název veličiny</i>
\emptyset	[mm]	průměr
d_a	[mm]	velikost ok síta
d_{50}	[mm]	velikost středního zrna
s	[-]	stupeň stejnoměrnosti
Φ_h	[°]	úhel intergranulárního tření
μ	[-]	součinitel intergranulárního tření
p	[kPa]	tlak
t	[°C]	teplota
P	[W]	příkon
σ	[kPa]	napětí
T	[s]	čas
m	[kg]	hmotnost
V	[ml]	objem

Obsah

1.	Rešerše současného stavu adaptivního uchopování	- 9 -
1.1.	Teorie uchopování.....	- 9 -
1.2.	Základní rozdělení aktivních úchopných hlavíc	- 12 -
1.3.	Speciální úchopné hlavice	- 12 -
1.3.1.	Chapadlo s pryžovými prsty firmy Sommer	- 12 -
1.3.2.	Chapadlo pro vnitřní uchopování s pryžovou membránou.....	- 13 -
1.3.3.	Pryžové chapadlo aktivně ovládané podtlakem	- 14 -
1.3.4.	Chapadlo pro uchopování textilií a pórovitých hmot	- 15 -
1.4.	Technologie poddajného uchopování.....	- 16 -
1.4.1.	Adaptivní vakuový systém	- 16 -
1.4.2.	Vaky naplněné elektro reologickou kapalinou.....	- 17 -
1.4.3.	Využití pěnových (porézních) hmot jako adaptivních prvků	- 18 -
1.4.4.	Pružný úchopný prvek chapadla.....	- 19 -
1.4.5.	Mechanický ÚP na principu kolíků	- 20 -
1.4.6.	Chapadlo využívající magnetického prášku.....	- 20 -
1.4.7.	Chapadlo na principu vícekomorových trubicových prstů	- 21 -
1.4.8.	Využití plastových lamel	- 21 -
1.4.9.	Mnohočetné posuvné ploché čelisti	- 21 -
1.4.10.	Vaky nafukované stlačeným vzduchem.....	- 22 -
1.4.11.	Polymery s tvarovou pamětí	- 22 -
1.4.12.	Elektroadhezní chapadla	- 24 -
2.	Varianty koncepčního řešení adaptivního chapadla.....	- 26 -
2.1.	Adaptivní vakuový systém	- 26 -
2.2.	Magneto a elektroeologické kapaliny	- 26 -
2.3.	Rozhodovací analýza	- 29 -
3.	Konstrukce testovacího zařízení	- 31 -
3.1.	Nástavec	- 31 -
3.2.	Latexové vaky	- 32 -
3.3.	Granuláty.....	- 35 -
4.	Experiment.....	- 41 -
4.1.	Ohledávací experiment.....	- 41 -
4.2.	Výsledek ohledávacího experimentu	- 47 -

4.3.	Ortogonální experiment	- 48 -
4.4.	Cíl a struktura experimentu	- 48 -
4.5.	Vyhodnocení experimentu	- 50 -
4.6.	Návrh chapadla na základě experimentu	- 54 -
5.	Závěr a zhodnocení	- 57 -
6.	Literatura.....	- 59 -

Seznam obrázků

Obrázek 1 Uchopení párem pevných úchopných prvků [3]	- 11 -
Obrázek 2 Uchopení pevným a poddajným úchopným prvkem [3].....	- 11 -
Obrázek 3 Uchopení dvěma poddajnými úchopnými prvky [3].....	- 11 -
Obrázek 4 Uchopení poddajného objektu [3].....	- 11 -
Obrázek 5 Uchopení poddajného objektu poddajnými úchopnými prvky [3]	- 11 -
Obrázek 6 Chapadlo s pryžovými prsty od firmy Sommer[5]	- 12 -
Obrázek 7 Chapadlo pro vnitřní uchopování s pryžovou membránou [5]	- 13 -
Obrázek 8 Pryžové chapadlo firmy Sommer aktivně ovládané podtlakem[5]	- 14 -
Obrázek 9 Úchopná hlavice pro uchopování textilií a pórovitých hmot [5].....	- 15 -
Obrázek 10 Tvarové uchopení zaháknutím	- 15 -
Obrázek 11 Adaptivní vakuový systém používající mleté kávy jako granulátu [7] -	16 -
Obrázek 12 Schéma funkce hmatového senzoru [8]	- 17 -
Obrázek 13 Princip V-Gripu [9].....	- 18 -
Obrázek 14 Uchopování různých tříd součástí [9]	- 18 -
Obrázek 15 Princip pružného úchopného prvku [10].....	- 19 -
Obrázek 16 Uspořádání kolíků úchopného prvku přímo na chapadle [11]	- 20 -
Obrázek 17 Chapadlo na principu magnetického prášku [12]	- 20 -
Obrázek 18 Princip vícekomorových pneumaticky ovládaných prstů [12]	- 21 -
Obrázek 19 Chapadlo na principu lamel [12].....	- 21 -
Obrázek 20 Chapadlo s mnohačetnými posuvnými čelistmi [12].....	- 22 -
Obrázek 21 Vaky nafouknuté stlačeným vzduchem [12]	- 22 -
Obrázek 22 Chapadlo s prsty z polymerů s tvarovou pamětí [14]	- 23 -
Obrázek 23 Teplotní závislost času navrácení polymeru [12].....	- 23 -
Obrázek 24 Pěna z polymeru s tvarovou pamětí [12].....	- 24 -
Obrázek 25 Aplikace elektroadheze na komplexně tvarované objekty [13]	- 24 -
Obrázek 26 Oboustranná elektroadhezní folie [13]	- 25 -
Obrázek 27 Formování struktury dipolárních částic v ER kapalině [18].....	- 27 -
Obrázek 28 Tetragonální tělesově středěná mřížka v ER kapalině [18]	- 28 -
Obrázek 29 Nástavec s vyvrtanými kanály pro vakuum	- 31 -
Obrázek 30 Uspořádání filtru a mřížky v nástavci	- 32 -
Obrázek 31 Trn pro výrobu vaků	- 32 -
Obrázek 32 Postup výroby sádrové formy.....	- 33 -

Obrázek 33 Forma pro odlévání vaků	- 34 -
Obrázek 34 Odlévání latexu do sádrové formy.....	- 34 -
Obrázek 35 Všechny vyrobené vaky	- 35 -
Obrázek 36 Graf součtové křivky zrnitosti sklářského písku.....	- 37 -
Obrázek 37 Granuláty.....	- 40 -
Obrázek 38 Pneumatické schéma testovacího zařízení	- 41 -
Obrázek 39 Úchopný prvek	- 42 -
Obrázek 40 Testovací zařízení pro měření síly vytržení	- 43 -
Obrázek 41 Postup najíždění na objekt a měření síly vytržení	- 43 -
Obrázek 42 Měření síly odporu proti najíždění na vážní plošině	- 44 -
Obrázek 43 Testované objekty	- 45 -
Obrázek 44 Výsledný graf na ose x jsou objekty	- 46 -
Obrázek 45 průměrné síly při najíždění na objekty 02 a 04.....	- 46 -
Obrázek 46 Standardizovaný Paretův diagram pro sílu vytržení	- 50 -
Obrázek 47 Graf hlavních efektů pro sílu vytržení	- 51 -
Obrázek 48 Standardizovaný Paretův diagram pro odporovou sílu.....	- 52 -
Obrázek 49 Graf hlavních efektů pro odporovou sílu	- 52 -
Obrázek 50 Chapadlo s vakem připevněným pomocí příruby	- 54 -
Obrázek 51 Dvoukomorové adaptivní chapadlo	- 55 -
Obrázek 52 Princip dvoukomorového vaku	- 55 -
Obrázek 53 Chapadlo s mechanickým dotlačením [3].....	- 56 -

Úvod

Adaptivní úchopné prvky procházejí v současné době velkým rozvojem. Při manipulaci s výrobky ze skla a jinými citlivými výrobky je tvarová poddajnost úchopných prvků důležitá. Využití nalézá poddajné uchopování i při manipulaci s různě tvarově členitými objekty. Tématem práce je tedy na základě rešerše současného stavu navrhnout koncepční řešení pro poddajné úchopné prvky. Z koncepčních řešení bude jedno vybráno a bude provedeno konstrukční řešení. Součástí práce je také tvorba výrobní dokumentace ověřovacího zařízení, na kterém bude vybrané řešení testováno.

V první kapitole se věnuji podrobné rešerši současných technologií poddajného uchopování.

Druhá kapitola se zabývá bližším popsáním dvou vybraných variant koncepčních řešení. Jedná se o adaptivní vakuový systém a elektoreologické a magnetoreologické kapaliny. Je zde hlouběji než v rešerši vysvětlen fyzikální princip variant. Varianty jsou zde zhodnoceny z více hledisek a je provedena rozhodovací analýza. Vítěznou variantou je adaptivní vakuový systém.

Třetí kapitola pojednává o konstrukci testovacího zařízení a jeho výrobě. Součástí ověřovacího zařízení je funkční prototyp chapadla, proto je v této kapitole zmíněna i výroba vaků z latexu a teorie mechaniky granulátů. Jsou zde podrobně popsány všechny testované granuláty.

Předmětem čtvrté kapitoly jsou experimenty, jejichž cílem bylo zjistit, které faktory mají vliv na funkci chapadla při poddajném uchopování. Je zde uvedeno zhodnocení výsledků a jejich opodstatnění z fyzikálního hlediska. Na základě výsledků je navrženo chapadlo.

Pátá kapitola je zhodnocení přínosů práce a možností využití navrhovaných chapadel.

1. Rešerše současného stavu adaptivního uchopování

Chapadla jsou koncové efekty robotů a plní funkci uchopování, sevření objektu, manipulace a fixace po dobu jeho přemísťování. Současně s robotem se podílejí na realizaci polohování a orientace předmětu.

Výrobou chapadel se dnes zabývá celá řada firem. Pro vývoj nového poddajného prvku jsem se nejprve zaměřil na teorii uchopování a potom provedl rozbor způsobů upínání úchopných prvků na dnes komerčně dodávaná chapadla. Také jsem si uvědomil, že pro použití chapadel k uchopování křehkých materiálů se bude nutné zaměřit i na možnost řízení zdvihu, rychlosti pohybu a úchopné síly chapadla. Je totiž jasné, že poddajné úchopné prvky nám nebudou k ničemu, když chapadlo stiskne součást příliš velikou silou. Poddajné úchopné prvky se v tom případě zdeformují až do krajní polohy a dojde k porušení uchopovaného předmětu. Mluvím zde o manipulaci s křehkými či měkkými materiály. Dříve byla používána hlavně chapadla pneumaticky řízená, která jsou levnější než chapadla elektrická. Dnes se rozšiřují i elektrická chapadla, hlavně kvůli možnosti přesného řízení servomotory. Když porovnám elektřinu a pneumatiku naleznu tyto rozdíly: Pneumatika má omezené možnosti řízení síly - ta se jen obtížně může měnit v průběhu uchopování, těžko říditelný rozsah pohybu - opět pevně nastavitelný před úkonem, nikoli v průběhu operace. Ale dá se u ní v určitém rozsahu nastavit rychlost pohybu. Kdežto elektřina má velmi přesně nastavitelnou sílu i rychlost a jí poháněná chapadla se dají přesně polohovat. Nejlepší je, že se rychlost i síla dají měnit podle požadavků během operace uchopování.

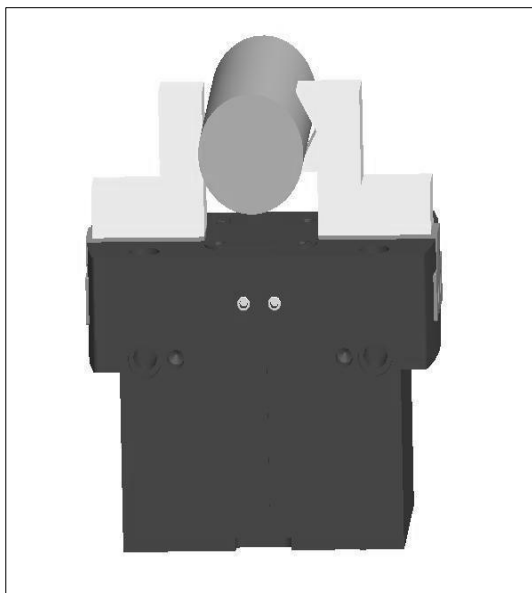
1.1. *Teorie uchopování*

Uchopením se rozumí mechanický kontakt takzvaných úchopných prvků s povrchem objektu. Tímto kontaktem dochází k tuhému fixování. Významný faktor, který ovlivňuje uchopení je jeho struktura uchopení. Tou se rozumí počet, kvalita a rozmístění kontaktů úchopných prvků. Podle charakteru uchopení rozlišujeme uchopení silové, tvarové a kombinaci těchto dvou. Rozdělení různých druhů úchopů naleznete v publikaci Efektory průmyslových robotů – F. Novotný na straně 4. Uchopovací sílu můžeme ovládat buď přímo u aktivních chapadel či nepřímo u pasivních, kde je obvykle svázaná s úchopnými prvky. Podle kontaktu se dají jednotlivé úchopné prvky dělit na mechanické, magnetické, podtlakové, adhezní a

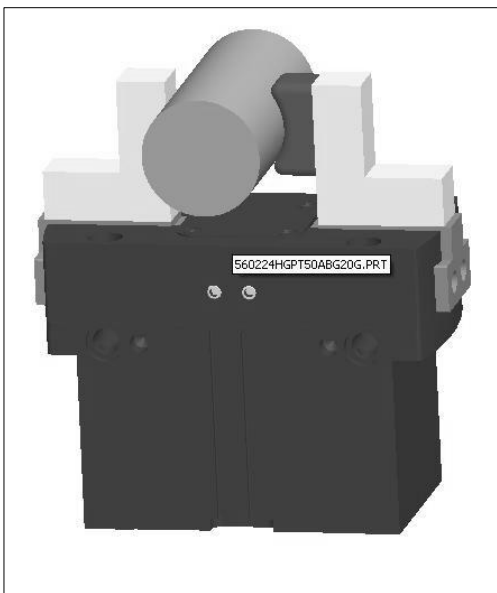
speciální. Chapadla se také liší počtem úchopných prvků. Ten určíme hlavně podle tvaru objektu, jeho tuhosti a hmotnosti. Také je ovlivněn požadovanou přesností upnutí. Celkový počet úchopných prvků je dán součtem pasivních a aktivních úchopných prvků: $PU (PA + PP)$.

Kontaktní silou (contact force) rozumíme všechny síly, kterými efektor při držení na objekt působí včetně sil třecích. O uchopovací síle (gripping force) mluvíme jen v případě, že uchopujeme jen ve dvou kontaktních bodech a nejsou-li přítomny jiné síly a momenty než kontaktní síly. Pro jednoznačné tvarové fixování objektu je zapotřebí 7 kontaktních bodů. Upnutí ale téměř nikdy není stoprocentně tvarové, kvůli působení třecích sil. Pokud se rozhodneme třecích či jiných sil využít, dostáváme úchop kombinovaný. Příklady držení objektu můžeme opět nalézt v publikaci Efektory průmyslových robotů – F. Novotný na straně 4. Dalšími významnými faktory jsou, uchopujeme-li z vnější či vnitřní strany, poloha těžiště objektu vůči čelistem, a jestli čelisti uchopují mimo rovinu svého pohybu. [1], [2]

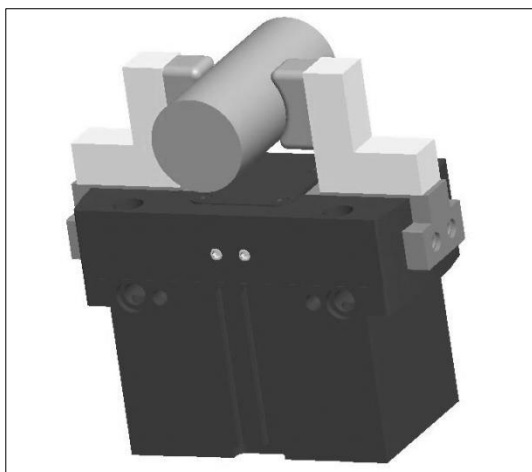
Co se týče poddajnosti uchopení, můžeme úchopy chapadlem se dvěma čelistmi rozdělit na uchopení párem pevných úchopných prvků, uchopení pevným a poddajným úchopným prvkem uchopení dvěma poddajnými úchopnými prvky, uchopení poddajného objektu dvěma pevnými úchopnými prvky, uchopení poddajného objektu poddajnými úchopnými prvky (obr. 1-5).



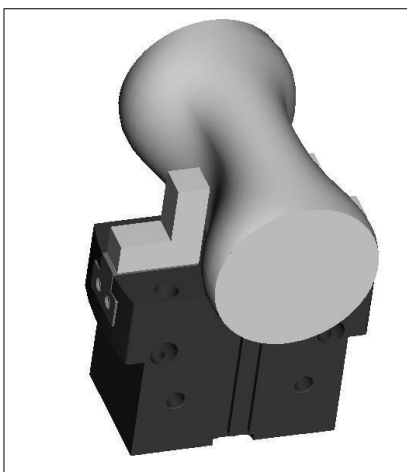
Obrázek 1 Uchopení párem
pevných úchopných prvků [3]



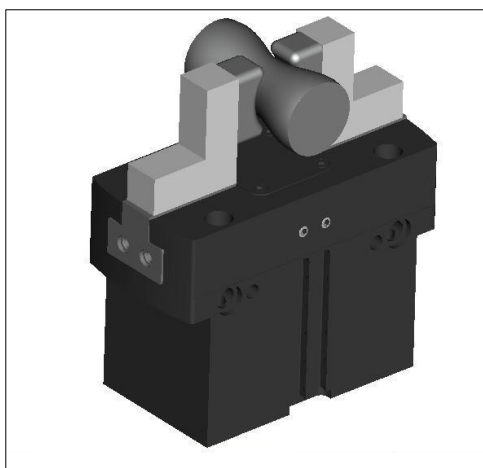
Obrázek 2 Uchopení pevným a
poddajným úchopným prvkem [3]



Obrázek 3 Uchopení dvěma
poddajnými úchopnými prvky [3]



Obrázek 4 Uchopení poddajného objektu
dvěma pevnými úchopnými prvky [3]



Obrázek 5 Uchopení poddajného objektu poddajnými úchopnými prvky [3]

1.2. Základní rozdělení aktivních úchopných hlavic

- Chapadla se dvěma či třemi posuvnými úchopnými prvky
- Chapadla se dvěma otočnými úchopnými prvky
- Speciální úchopné hlavice

1.3. Speciální úchopné hlavice

1.3.1. Chapadlo s pryžovými prsty firmy Sommer

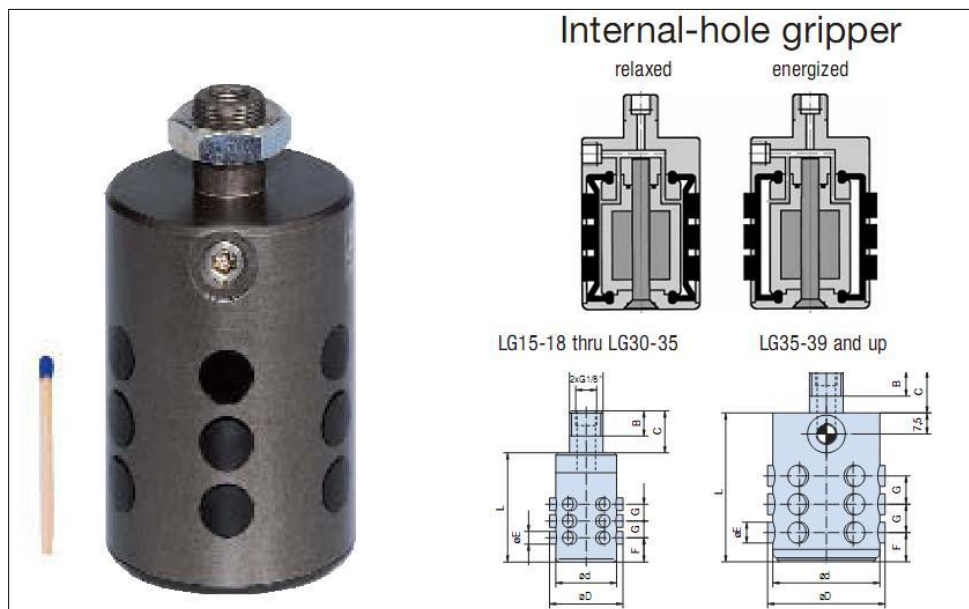
Po přivedení tlakového vzduchu se prsty ohnou podle uchopovaného objektu [5]. Strukturu uchopení tímto chapadlem tvoří dva částečně poddajné prsty a případně prismatický nepoddajný doraz. Jedná se o aktivní adaptivitu. Teplota použití je jen do 80°C.



Obrázek 6 Chapadlo s pryžovými prsty od firmy Sommer[5]

1.3.2. Chapadlo pro vnitřní uchopování s pryžovou membránou

Vysouvání každého palce nezávisle umožňuje jistou míru adaptivity. Uchopení je třecími silami. Ty jsou díky velkému počtu prstů a jejich pryžovému povrchu značné. Toto uchopení dokáže manipulovat s poměrně těžkými součástmi, jako je například blok motoru. Použitelné je do teploty 80°C.



Obrázek 7 Chapadlo pro vnitřní uchopování s pryžovou membránou [5]

1.3.3. Pryžové chapadlo aktivně ovládané podtlakem

Tento druh chapadla se hodí pro manipulaci s lehkými a křehkými objekty, jako například disk CD [5].

Jedná se o uchopení dvěma prsty využívajících třecích sil. Pokud místo podtlaku zavedeme tlakový vzduch, je možné uchopovat vnitřně. Teplota použití je do 80°C



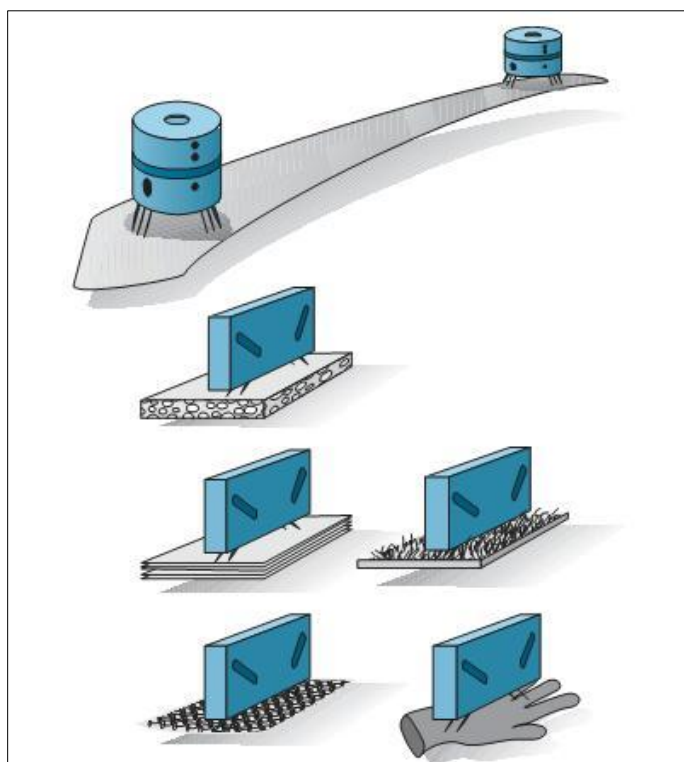
Obrázek 8 Pryžové chapadlo firmy Sommer aktivně ovládané podtlakem[5]

1.3.4. Chapadlo pro uchopování textilií a pórovitých hmot



Obrázek 9 Úchopná hlavice pro uchopování textilií a pórovitých hmot [5]

Toto chapadlo využívá k uchopování objektů technologie tvarového uchopení zaháknutím.



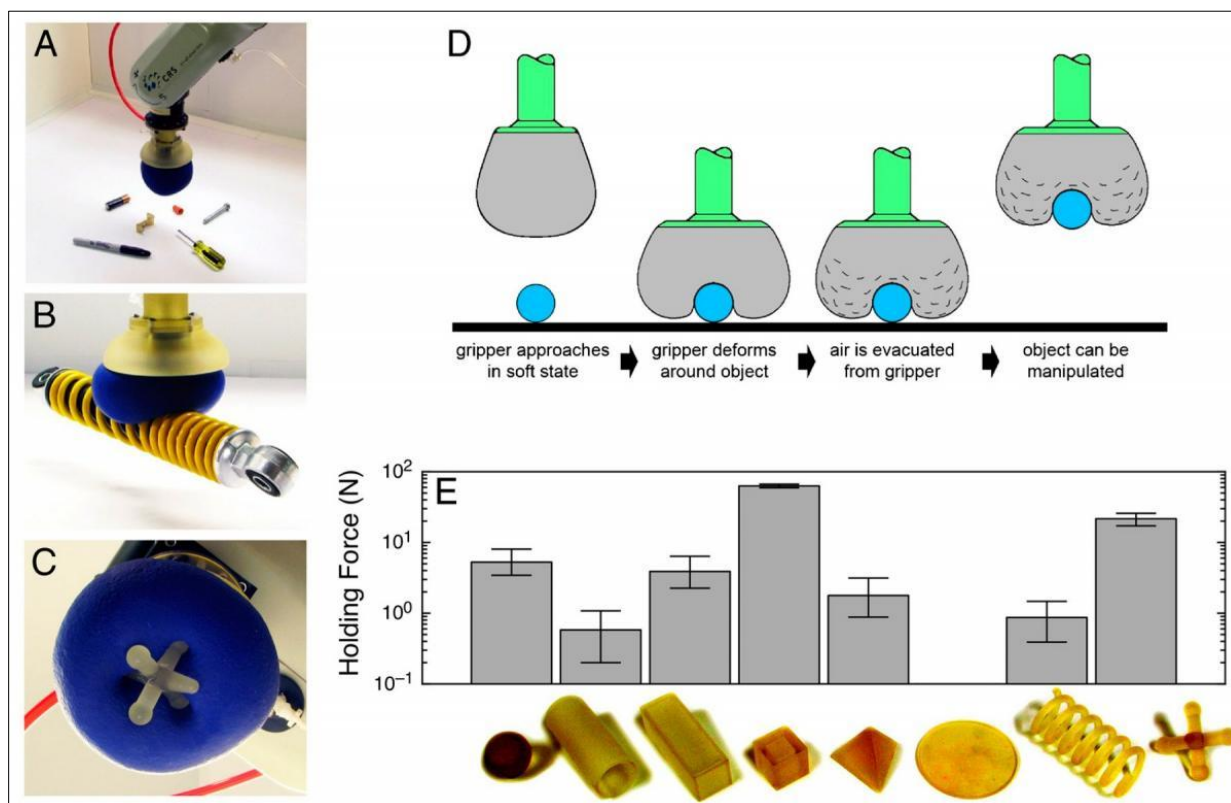
Obrázek 10 Tvarové uchopení zaháknutím

1.4. Technologie poddajného uchopování

V praxi je již využíváno mnoho technologií, které se dokážou svým tvarem uchopovanému objektu přizpůsobit. Některé z nich jsou zatím jen ve stádiu vývoje, jiné už doopravdy fungují.

1.4.1. Adaptivní vakuový systém

Princip této metody je již znám delší dobu a využíván ve zdravotnictví, jako rychlodlaha pro fixaci končetin. Funguje takto – vakuotěsný obal z pryže je naplněn granulátem. Při atmosférickém tlaku uvnitř obalu je tento „polštářek“ tvárný, ovšem při vyčerpání vzduchu se stává tuhým. Dokud je „polštářek“ měkký, je natlačen na součást, přijme její tvar. Následuje zvakuování polštářku a manipulace. Úspěšnou verzí této technologie je chapadlo vyvinuté na Cornellské univerzitě ve státě New York. Nazvali ho jamming robotic gripper. Jako granulátu je zde použita mletá káva. Její výhody jsou malá hmotnost a také to, že po vyčerpání vzduchu je velmi tvrdá. Struktura uchopení je zde tvořena pouze jedním úchopným prvkem, který ovšem obklopí součást z velké části. Jedná se tedy o tvarové uchopení. Teplotní využitelnost této technologie je závislá na teplotní odolnosti obalu a granulátu. Poddajnost této technologie je aktivní.



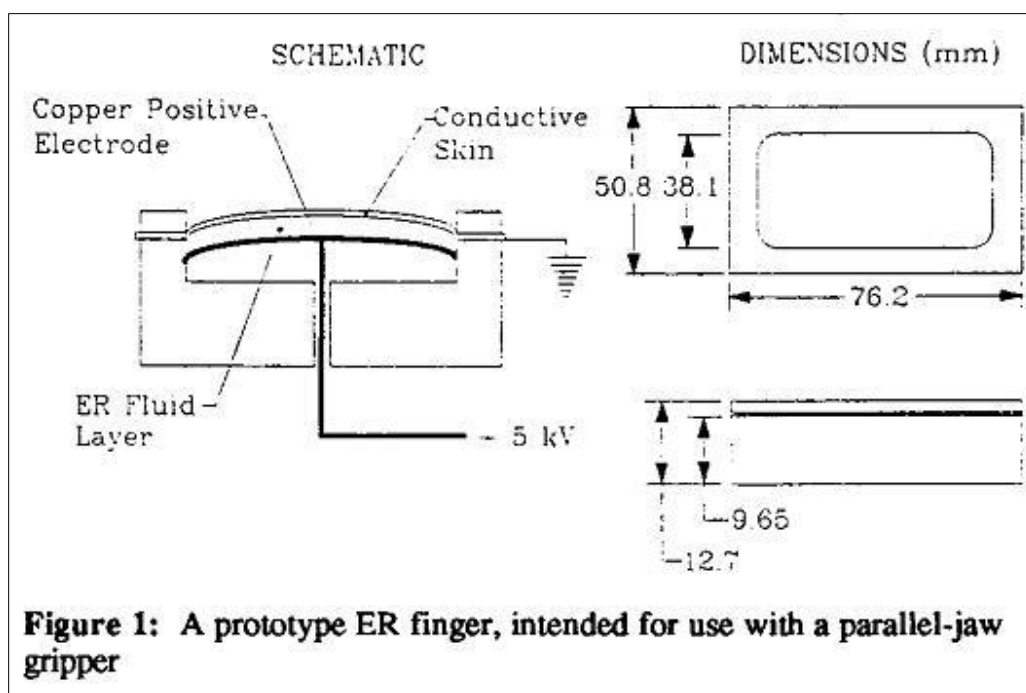
Obrázek 11 Adaptivní vakuový systém používající mleté kávu jako granulátu [7]

1.4.2. Vaky naplněné elektro reologickou kapalinou

Tato technologie ještě není v praxi používána, nicméně stojí za to uvést její princip a možné využití. Elektro reologická kapalina (electro rheological fluid) se chová jako kapalina, je-li ovšem vystavena elektromagnetickému poli, změní se v pevnou látku s pevností několika kPa (skoková změna viskozity). Rychlost odezvy se pohybuje v řádech milisekund. Známý jsou 2 způsoby, jak tento jev realizovat pro chapadla. Prvním je umístění vaků na pólové nástavce elektromagnetu, přičemž musí být uchopovaná součást kovová. Princip je pak podobný jako u adaptivního vakuového systému. [1]

Jiným, velmi zajímavým způsobem, je použití malých polštářků, které slouží i jako hmatové senzory. Tento malý polštářek má v sobě měděnou elektrodu a jeho povrch je podle obrázku taktéž vodivý a funguje jako el. kondenzátor. Jeho kapacitu můžeme měřit a mění se podle zatížení (přiblížení povrchu polštářku k elektrodě). Při přivedení el. proudu se polštářek změní v pevnou látku, která má negativní tvar uchopované součásti. Použijeme-li vysokého napětí je tento způsob i energeticky málo náročný.

Tato metoda byla navržena pro použití u chapadel s paralelním pohybem čelistí. Jak její hmatová schopnost, tak i její tvarová adaptivita by určitě byly výhodné při uchopování křehkých výrobků. [8]



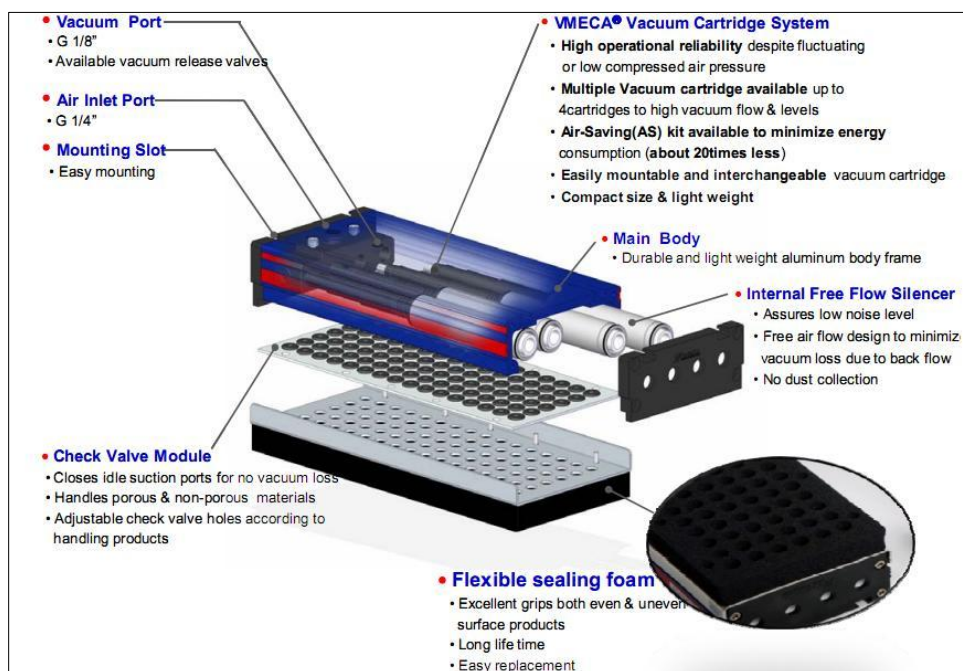
Obrázek 12 Schéma funkce hmatového senzoru [8]

1.4.3. Využití pěnových (porézních) hmot jako adaptivních prvků

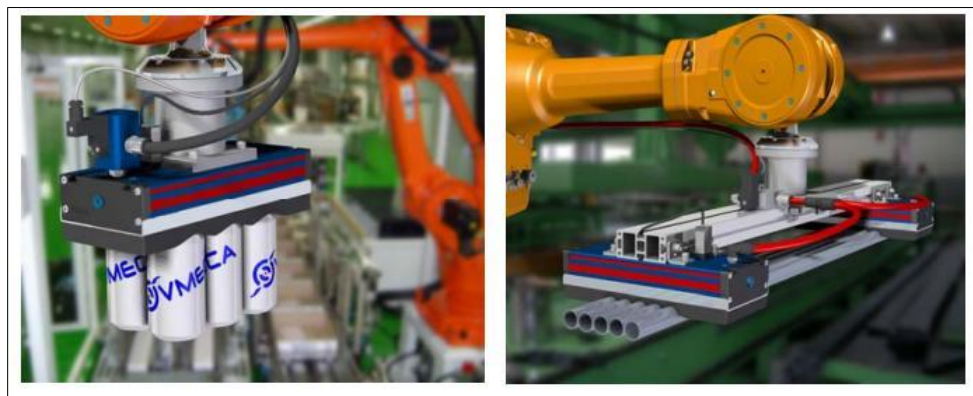
V-Grip systém firmy VMECA využívá pro uchopování vakuum. Místo přísavek je ovšem vybaven porézním těsnícím blokem, ve kterém jsou v matici uspořádané otvory. Systém má hned 2 zajímavá řešení, která by jedno bez druhého jen těžko fungovala:

- 1) Deformací porézního bloku se dokáže tvarově přizpůsobit mnoha objektům a to nejen plochého tvaru.
 - 2) Volné vakuové porty se samy uzavřou, aby nedocházelo ke ztrátám vakua.
- [9]

Uchopování V-Gripem je kombinací silového a tvarového uchopování a adaptivita je zde pasivní, jako důsledek sil vyvozených vakuem. Pracovní teplota je -20 až 80°C.



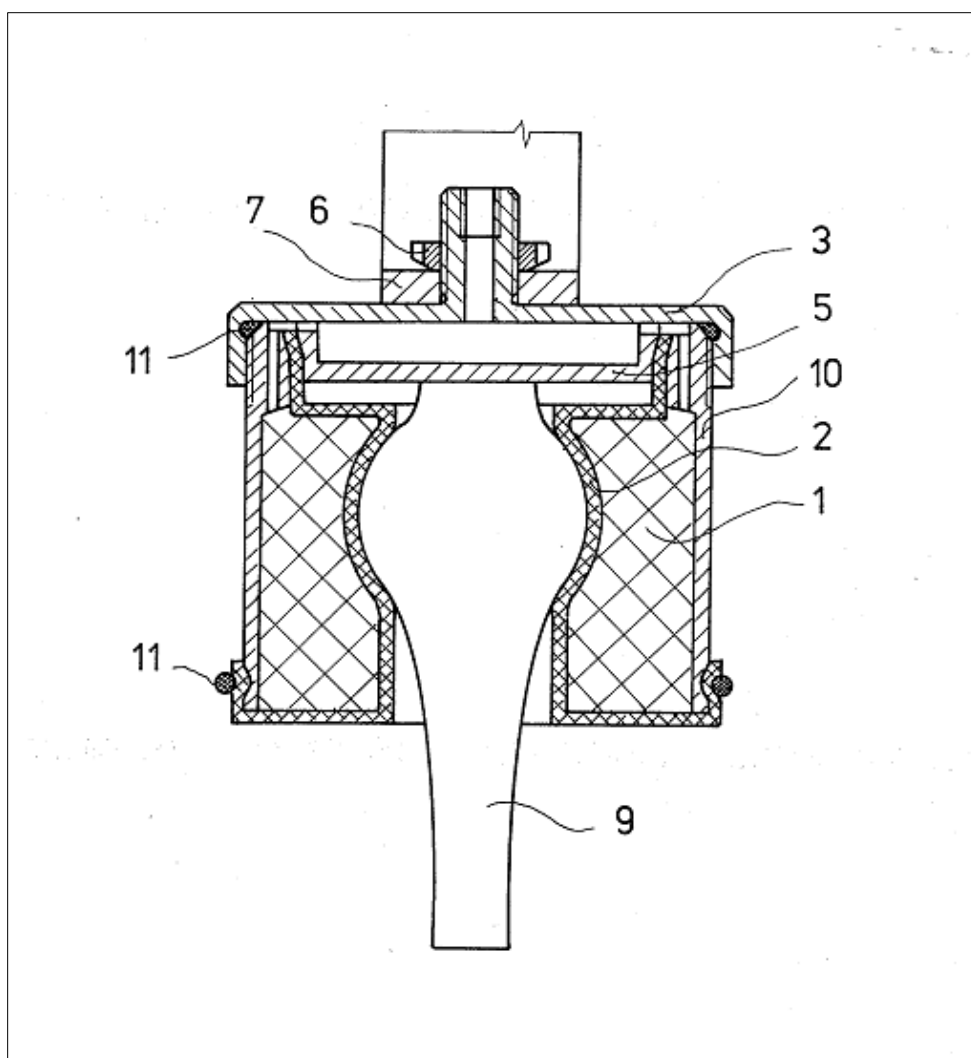
Obrázek 13 Princip V-Gripu [9]



Obrázek 14 Uchopování různých tříd součástí [9]

1.4.4. Pružný úchopný prvek chapadla

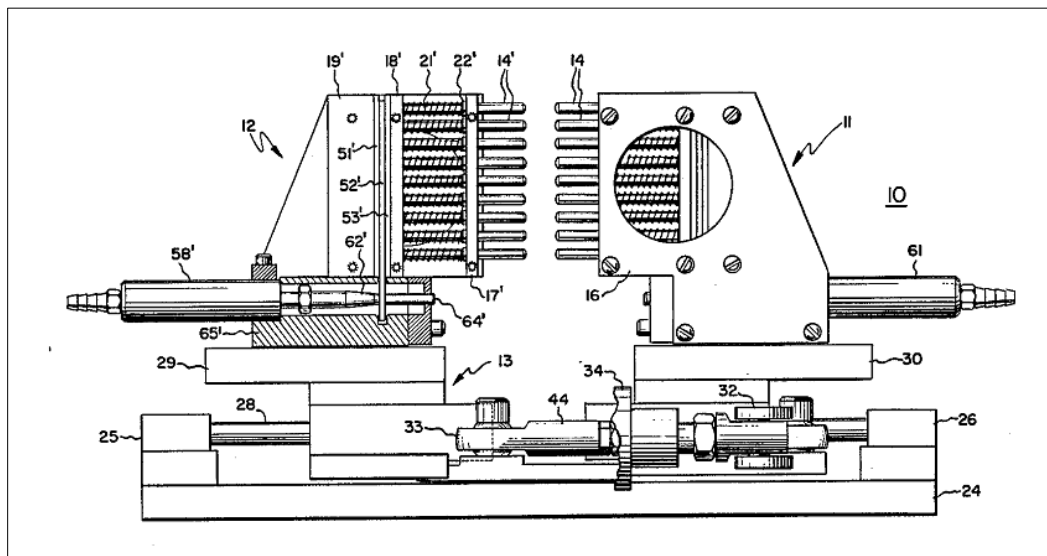
Podstata pružného úchopného prvku spočívá v tom, že je vytvořen tělesem z pružné, objemově stlačitelné hmoty, uzavřeném vzduchotěsně evakuovatelným elastickým pláštěm s tvarem přizpůsobeným uchopovanému místu objektu. Těleso může být vytvořeno z hmoty s otevřenou pórovitostí. Evakuovatelný elastický plášť může obklopovat alespoň část vnějšího povrchu tělesa. Evakuovatelný plášť může obklopovat alespoň část dutiny tělesa z pružné, objemově stlačitelné hmoty. Evakuováním elastického pláště se těleso z pružné hmoty deformuje a umožní volné najetí na objekt. Zavzdušněním elastického pláště se těleso částečně zpětně deformuje a dostává se do kontaktu s objektem. Úchopná síla je vyvozována pasivně v důsledku pružné deformace tělesa a elastického pláště [10].



Obrázek 15 Princip pružného úchopného prvku [10]

1.4.5. Mechanický ÚP na principu kolíků

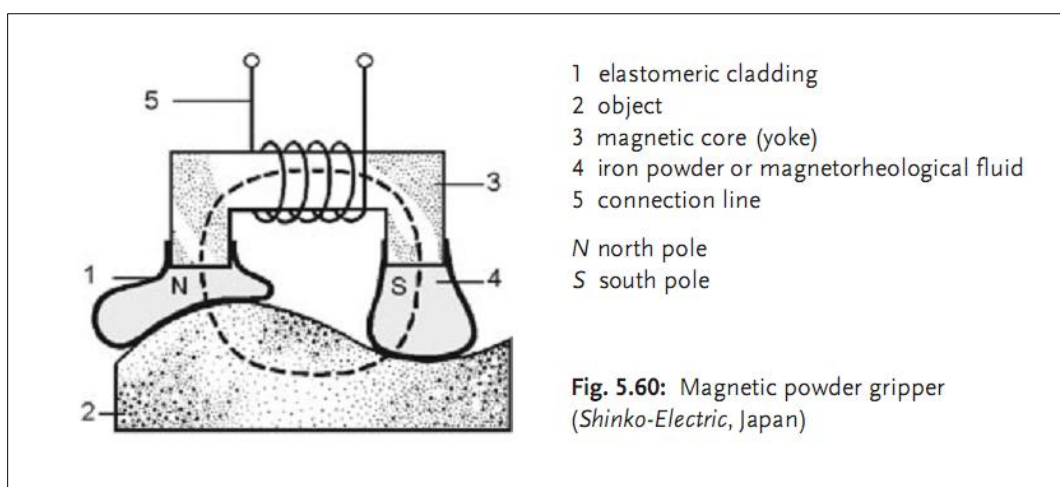
Tyto kolíky jsou uspořádány v matici a při kontaktu s uchopovaným objektem se zasunou podle jeho tvaru. Následně jsou fixovány buď mechanicky, nebo hydraulicky. [2]



Obrázek 16 Uspořádání kolíků úchopného prvku přímo na chapadle [11]

1.4.6. Chapadlo využívající magnetického prášku

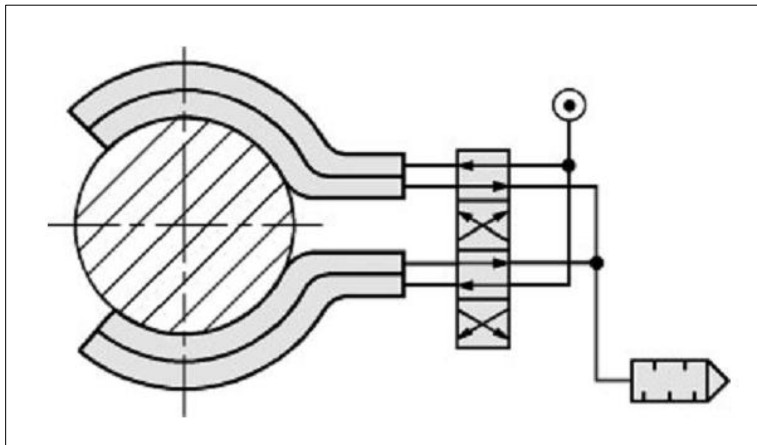
Toto chapadlo je používáno pro manipulaci s odlitky z oceli či litiny. Čelisti se sestávají z plastového vaku naplněného buď magneticky měkkým práškem, nebo magnetoreologickou kapalinou. To umožňuje magnetickému toku projít vakem bez příliš velkého počtu mezer mezi vakem a objektem. Na obr. 17 je princip chapadla využívajícího magnetického prášku. 1- plastový vak, 2- objekt, 3- elektromagnet, 4- ocelový prach či magnetoreologická kapalina [12]



Obrázek 17 Chapadlo na principu magnetického prášku [12]

1.4.7. Chapadlo na principu vícekomorových trubicových prstů

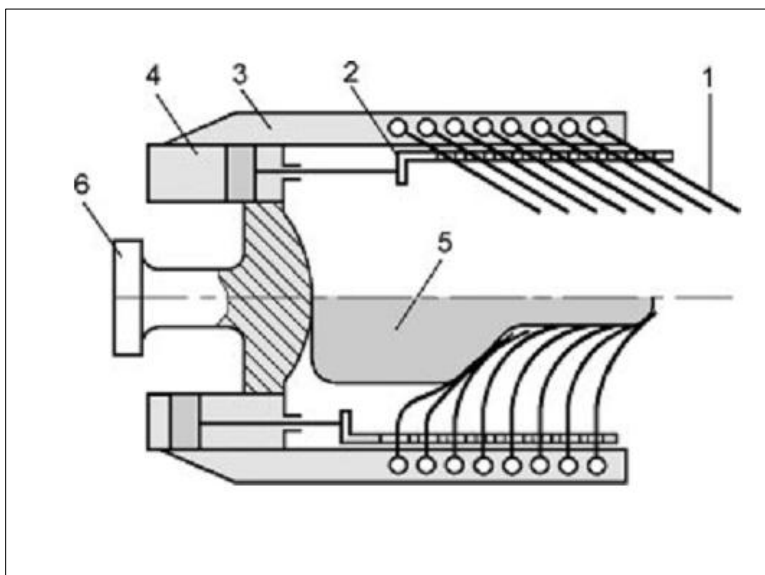
Prsty jsou ohýbány pomocí změny tlaků vzduchu v sousedních komorách. Vyvozuje jen malé uchopovací síly a životnost se snižuje při použití pro objekty s hrubým abrazivním povrchem. [12]



Obrázek 18 Princip vícekomorových pneumaticky ovládaných prstů [12]

1.4.8. Využití plastových lamel

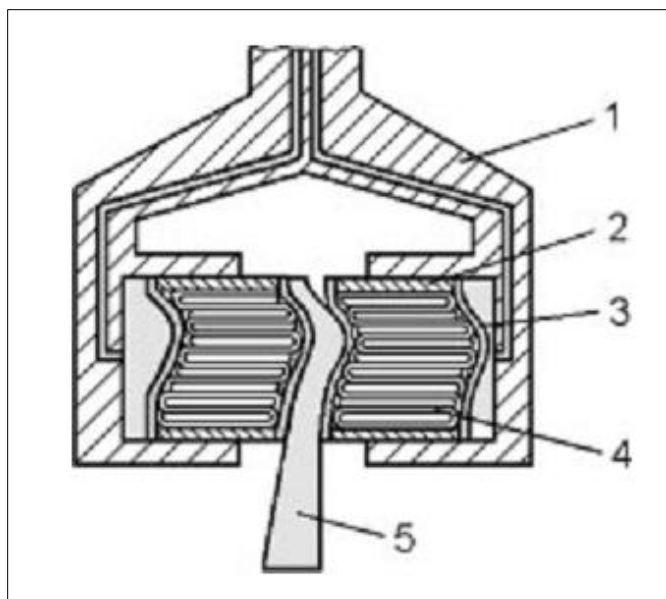
Při uchopování jsou lamely tlačeny proti objektu a tvarem se přizpůsobují jeho tvaru. Lamely z pružného plastu či oceli (1) jsou pomocí pneumaticky ovládané vidličky (2) natlačeny na objekt (5) [12].



Obrázek 19 Chapadlo na principu lamel [12]

1.4.9. Mnohočetné posuvné ploché čelisti

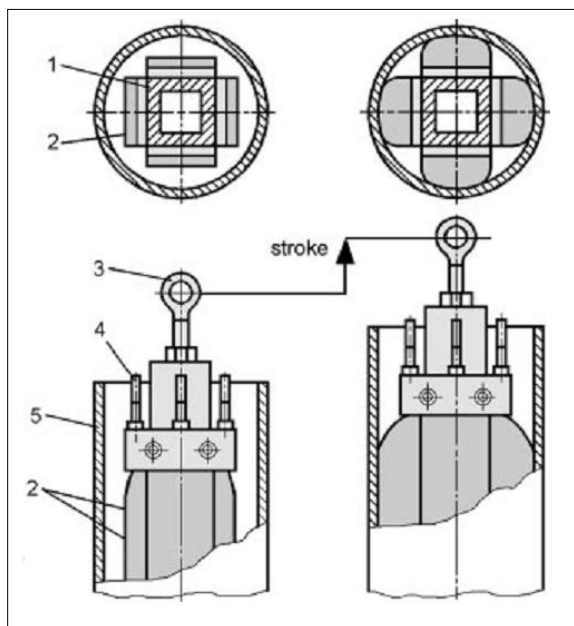
Čelisti jsou elastické, ale díky ocelovému pásu dokáží přenášet úchopnou sílu. Všechny čelisti jsou utěsněny a výsledný pohyb se podobá pohybu pneumatického válce. Na obr. 20 je princip 2- čelist, 3- pružný obal, 4- ocelový pás, 5- objekt [12]



Obrázek 20 Chapadlo s mnohačetnými posuvnými čelistmi [12]

1.4.10. Vaky nafukované stlačeným vzduchem

Nafouknutím vaků dojde ke kontaktu s uchopovaným objektem. Nejběžnějšími materiály jsou polyamidová tkanina, polyamid a polyester, nylon.



Obrázek 21 Vaky nafouknuté stlačeným vzduchem [12]

1.4.11. Polymery s tvarovou pamětí

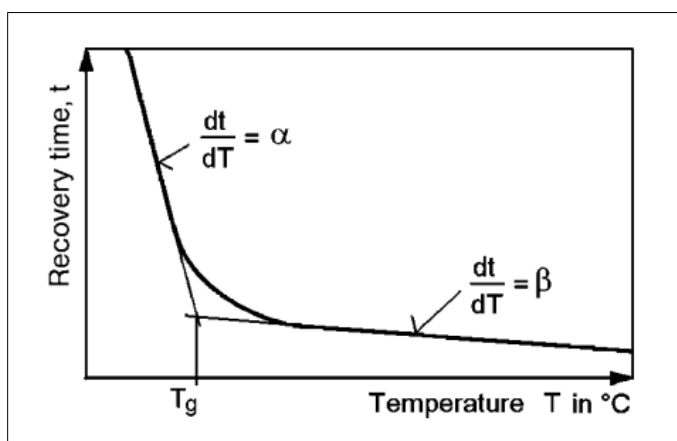
Byly prováděny pokusy s polymerovými vlákny, kde zaváděním různých tekutin dochází k prodlužování či smršťování, čímž lze dosáhnout určité míry přizpůsobení. Bohužel tato oblast zůstává zatím doménou jen laboratorních pokusů s velmi malým komerčním využitím.

Další možností, jak ovlivnit tvárnost plastů, je zvyšováním teploty na teplotu viskózního toku. Polymery, u kterých dochází k velmi výrazným změnám modulu pružnosti při překročení teploty viskózního toku, se nazývají **polymery s tvarovou pamětí** (shape memory polymers). Byly prováděny pokusy s použitím polymerů s tvarovou pamětí, jako prstů chapadla, ale zatím se jedná jen o laboratorní výzkum [14].

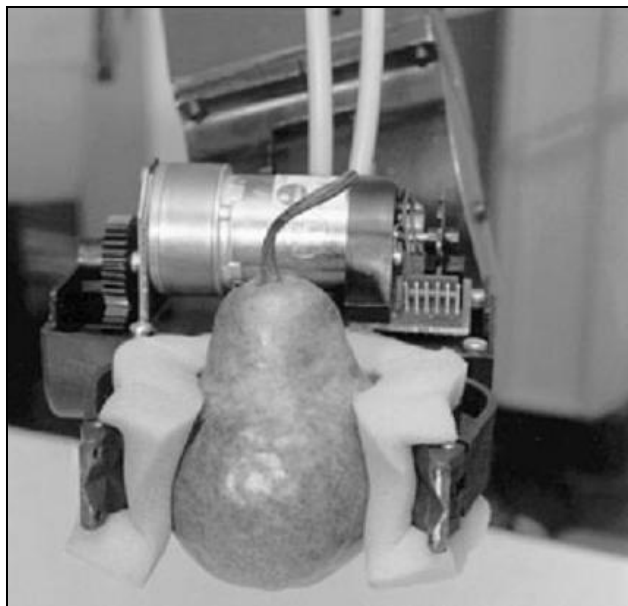


Obrázek 22 Chapadlo s prsty z polymerů s tvarovou pamětí [14]

Formováním těchto polymerů do pěn se dosáhne třírozměrné tvarové paměti. Čas, který tyto pěny potřebují k nabytí původního rozměru (recovery time), je závislý na teplotě. Díky propustnosti plynů se jsou potřeba jen krátké časy pro prohřátí a ochlazení za použití stlačeného vzduchu. Tyto pěny se hodí pro manipulaci s objekty jako ovoce, nevypálená keramika nebo křehké skleněné výrobky. Na obr. 25 je vidět aplikace pěny na poddajný ÚP [12].



Obrázek 23 Teplotní závislost času navrácení polymeru [12]



Obrázek 24 Pěna z polymeru s tvarovou pamětí [12]

1.4.12. Elektroadhezní chapadla

Firma SRI se zabývá vývojem elektroadhezní technologie pro chapadla, lezoucí roboty a jiné aplikace. Jejich technologie umožňuje řízenou vratnou adhezi na většinu vodivých i nevodivých povrchů. Výhodou je malá spotřeba elektrické energie a krátká reakční doba. Nevýhodou jsou malé síly. Elektroadheze využívá elektrostatických sil mezi materiálem a elektroadhezním povrchem. Elektroadhezní plošky se skládají z vodivých elektrod nanesených na povrchu polymeru. Při střídavém přivádění pozitivních a negativních nábojů na elektrody, elektrické pole způsobí opačné náboje na materiálu. To způsobí elektrostatickou adhezi mezi elektrodami a indukovanými náboji na materiálu. Pro představu zde uvedu příklad: elektroadhezní destička o rozměrech 1"x1" připevněná na dřevěný povrch snese zátěž 0,35 kg a spotřeba el. Energie je pouhých 70 μ W [13].



Obrázek 25 Aplikace elektroadheze na komplexně tvarované objekty [13]



Obrázek 26 Oboustranná elektroadhezní folie [13]

2. Varianty koncepčního řešení adaptivního chapadla

Z technologií uvedených v rešerši se pro tvarově poddajné uchopování nejvíce hodí adaptivní vakuový systém na principu granulátu a systém založený na principu elektoreologických či magnetoreologických kapalin. V následující kapitole bude provedeno jejich zhodnocení a za pomoci rozhodovací analýzy bude vybrána varianta pro konstrukci.

2.1. *Adaptivní vakuový systém*

K uchopení objektu je využíván vak naplněný partikulární látkou - granulátem. Přizpůsobení tvaru je díky přeskupování granulátu ve vaku. Dokud se částice posouvají vzájemně mezi sebou, hovoříme o intergranulárním přetváření. Jakmile se začnou přetvářet jednotlivé částice, jedná se již o přetváření intragranulární [16]. Míra tvarového přizpůsobení vaku s granulátem bude nejspíš záviset na schopnosti granulátu téct ve volném stavu a také na velikosti jeho částic. Při volbě příliš velkých částic, vzhledem k tloušťce vaku, by zřejmě docházelo jen k bodovému kontaktu mezi objektem a vakem.

Literatura popisující chování partikulárních látek je snadno dostupná, protože jejich chování zkoumalo již velké množství autorů. Jedná se například o knihu Základy mechaniky partikulárních látek od Jaroslava Fedy. Z této publikace je možné dozvědět se hodně o popisu i chování různých partikulárních látek. Výhodou použití partikulárních látek je, že jich je běžně k dostání široká škála.

Další součástí adaptivního vakuového systému je pružný vak, který musí být vzduchotěsný. Vak by měl mít průměr alespoň 50 mm, aby jej bylo možné jej vůbec použít pro uchopování poměrně malých objektů v řádech několika desítek mm. Takové vaky se běžně nevyrábějí, ale na trhu je spousta vaků menších rozměrů, jako např. dětské balónky aj.

2.2. *Magneto a elektoreologické kapaliny*

Jedná se o kapaliny, které dokáží skokově změnit svou viskozitu. Za normálních okolností se kapaliny chovají přibližně jako Newtonovská kapalina. Je-li magnetoreologická (MR) kapalina vystavena magnetickému poli, nastává v ní magnetoreologický efekt. Původně rovnoměrně rozptýlené mikročástice se vlivem působení homogenního magnetického pole stanou magnetickými dipóly. Částice se

začnou shlukovat do řetězců ve směru magnetických siločar a při ještě silnějším magnetickém poli vytvoří tetragonální tělesově středěnou mřížku, která je ideálním uspořádáním částic z hlediska pevnosti. Ve velkém měřítku se tento jev projeví změnou mechanických vlastností – viskozity a meze kluzu. Toto chování se dá tedy popsat jako viskoplastické. Přestane-li magnetické pole působit, ztratí kapalina nově nabyté vlastnosti a stává se znovu kapalinou. Její vlastnosti jsou podobné Newtonovské kapalině.

V elektoreologických (ER) kapalinách dochází k elektoreologickému efektu. Princip chování ER kapalin je podobný jako MR, jen přivedené pole je elektrické a kovové částice se stávají elektrickými dipóly. Do řetězců ve směru siločar jsou částice řazeny vlivem elektrického dipólového momentu. Makroskopicky se tento jev projeví stejně jako u MR kapalin [20].

Jiný zdroj dokonce uvádí, že při překročení určité úrovně elektrického pole dipolární částice vytvoří tetragonální tělesově středěnou mřížku. Obr. 27 ukazuje formování částic v ER kapalině po zavedení elektrického pole a na obr. 28 je vidět mikroskopický snímek z experimentálního měření tetragonální tělesově středěné mřížky a) vznik typických sloupců mezi elektrodami a b), c), d) difrakční vzory pro koule průměru 20 – 40,7 μm . Proces přeměny na tuhou látku je vratný s časovou změnou menší než 1 ms. Současné ER kapaliny dosahují pevnosti v tahu kolem 10 kPa, maximálně až 60 kPa [18].

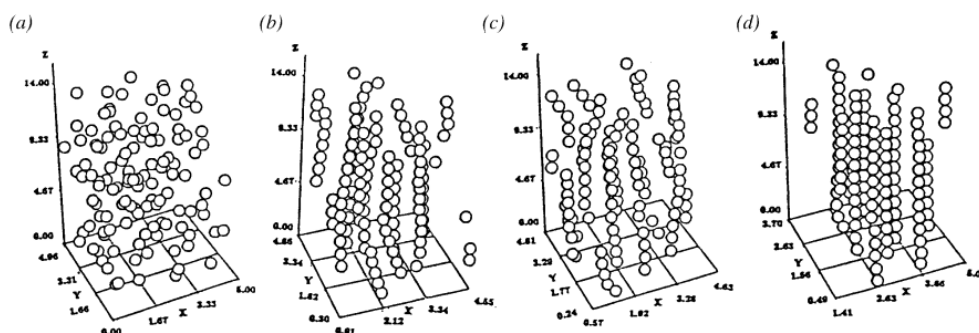
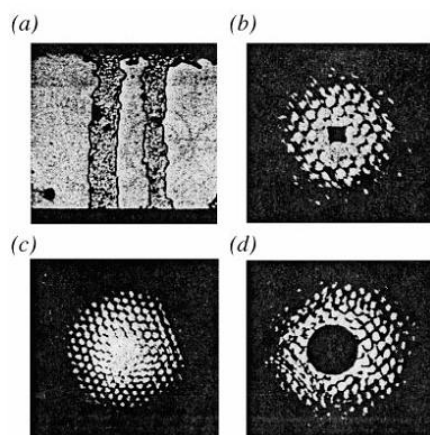


Fig. 1. BCT structure formation process. (a) In the initial state, dielectric particles are randomly distributed. (b) After 10 ms of applying a strong electric field, particles begin to move. (c) After 30 ms of applying a strong electric field, the lateral ordering is building. (d) After 180 ms of applying a strong electric field, single chains have been aggregated into a BCT lattice structure.

Obrázek 27 Formování struktury dipolárních částic v ER kapalině [18]



Obrázek 28 Tetragonální tělesově středěná mřížka v ER kapalině [18]

Ferokapaliny jsou koloidní směsi velmi malých částic do průměru 10 nm a nosné kapaliny. Díky velmi malé velikosti rozptýlených částic mohou být tyto suspenze označovány jako kapaliny. Částice jsou většinou sloučeniny železa. Díky velmi malým rozměrům částic se uplatní Brownův pohyb a ten způsobí rovnoměrné rozptýlení částic v kapalině a suspenze je tedy homogenní.

V MR kapalině jsou rozptýleny kovové částice o průměru řádově několik μm . Kvůli větším rozměrům a hmotnosti se částice již nerozptylují rovnoměrně Brownovým pohybem a dochází k samovolné sedimentaci.

Pro MR kapalinu je typické složení z 60 – 80 % nosné kapaliny a zbylých 40 - 20 % jsou částice v kapalině rozptýlené. Nosná kapalina má vliv na výsledné vlastnosti MR kapaliny, a to zejména na její trvanlivost. Jako nosnou kapalinu lze použít například vodu nebo olej.

Jako částic v MR kapalinách jsou využívány různé formy železa, jako např. hematit, magnetit nebo práškové železo. Trendem je vyrábět částice kompozitní. Jedná se většinou o základní druhy železných částic nebo částic z oxidů železa. Jejich vlastnosti jsou zdokonaleny vhodnou kombinací s jinými organickými nebo anorganickými látkami [20].

Nevýhodou MR kapalin je nutnost umístění do elektromagnetického pole. Tím se totiž konstrukce zařízení na jejich principu stává složitější. Ideálním umístěním pro MR kapalinu je mezi póly elektromagnetu, aby kapalinou procházelo dostatečně silné elektromagnetické pole.

Vak, ve kterém by byly kapaliny umístěny, by mohl být podobný, jako je pro adaptivní vakuový systém.

2.3. Rozhodovací analýza

Pro konstrukční řešení a testování byla určena tato kritéria:

- 1) Dostupnost technologie a dostupná úroveň znalostí o dané technologii
- 2) Možnost ověřit teoretické předpoklady o dané technologii experimenty
- 3) Vhodnost pro aplikaci na poddajné úchopné prvky
- 4) Finanční náročnost

Ad 1) Adaptivní vakuový systém je dostupnější technologií, jak z hlediska opatření granulátů, tak z hlediska dosavadních znalostí o chování partikulárních látek, jak již bylo zmíněno výše. Naproti tomu MR a ER kapaliny nejsou snadno k dostání a jejich poznávání stále probíhá.

Ad 2) Experimentování s reologickými kapalinami by bylo zjevně složitější, kvůli nutnosti vytvářet a usměrňovat elektromagnetická pole. Pro experimenty s adaptivním vakuovým systémem stačí zdroj vakua.

Ad 3) Reologické kapaliny budou mít rozhodně lepší vlastnosti při toku ve volném stavu, a tak by dokázaly dobře obklopit uchopovaný objekt. Na druhou stranu by přílišná tekutost soustavy mohla být na škodu. Nejspíš by ale bylo možné viskozitu řídit v průběhu celého uchopování. Problémy by také mohly nastat při uchopování nemagnetických materiálů, kdy by magnetické vlny neprocházely rovnoměrně kapalinou, obklopující tento objekt. Nerovnoměrnost elektromagnetického pole uvnitř vaku by vedla k nerovnoměrné viskozitě, případně pevnosti. Negativem by mohla být i již zmiňovaná sedimentace částic, kterou by případně bylo nutné řešit např. mícháním, třepáním nebo změnou polohy.

Adaptivní vakuový systém nebude mít tak dobré obkloповací vlastnosti vlivem intergranulárního tření, ale pevnost při evakuovaném stavu by měla být ve všech částech vaku stejná a jednoduše nastavitelná úrovní podtlaku.

Ad 4) Adaptivní vakuový systém vyžaduje pro své otestování zdroj vakua, který je ve školní laboratoři dostupný, granulát, vak z elastomeru a nástavec, na který by se tento vak nasadil. Jedná se tedy o poměrně málo finančně náročné položky.

Systém s reologickými kapalinami by znamenal sehnat reologickou kapalinu, musela by se objednat ze zahraničí, popřípadě by bylo možné reologickou kapalinu vyrobit. Práškové železo malých rozměrů je ale velmi drahé. 100 g práškového železa o středním průměru částic 4,5 – 5,2 μm vychází asi na 1500 Kč [20]. Dále by

bylo nutné opatřit alespoň jeden elektromagnet a nástavec s vakem, jako v prvním případě.

V následující tabulce je ukázána rozhodovací analýza.

A – Adaptivní vakuový systém

B – ER a MR kapaliny

PÁROVÉ SROVNÁNÍ KRITÉRIÍ					MATICE UŽITNOSTI ALTERNATIV					
Poř. Čís.	Název kritéria	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	X		A		B	
					Hodnota		Hodnota		Hodnota	
					prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená
1	Dostupnost technologie a znalostí	1	3	2	100	200	80	160	50	100
2	Možnost ověřit experimenty	2	2	3	100	300	80	240	60	180
3	Vhodnost pro aplikaci na ÚP	3	1	4	100	400	80	320	80	320
4	Finanční náročnost	0	4	1	100	100	90	90	60	60
CELKEM						1000		810		660
UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ [%]						100%		81%		66%
POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI								1.		2.

Tabulka 1 Rozhodovací analýza

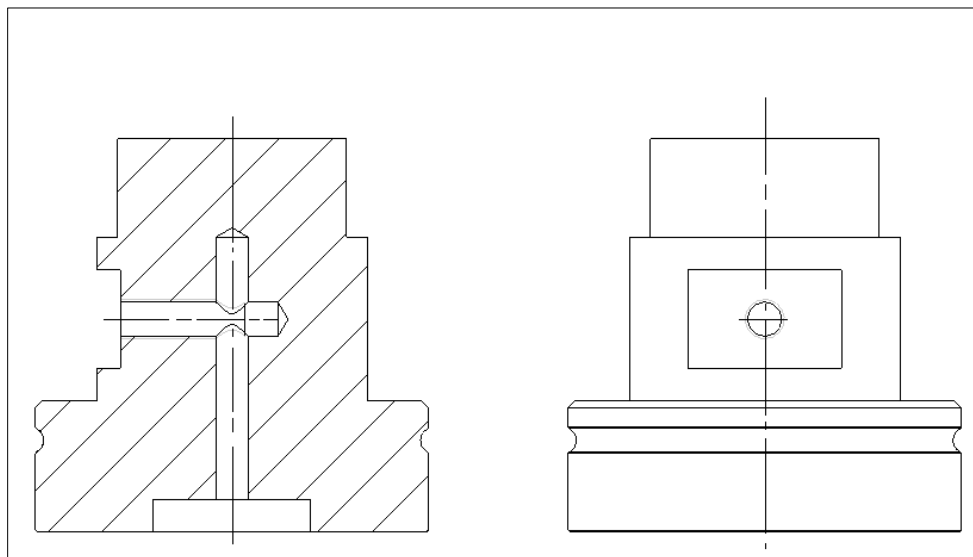
Podle rozhodovací analýzy byl pro otestování a konstrukční řešení vybrán **adaptivní vakuový systém**, který má 81% naproti tomu reologické kapaliny mají 66%.

3. Konstrukce testovacího zařízení

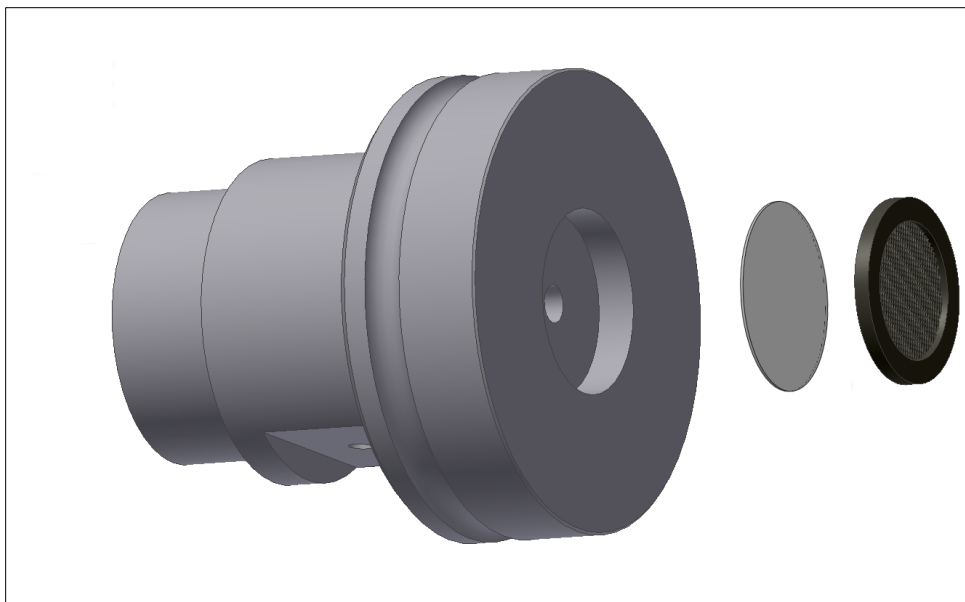
Z výše popsaných technologií byla pro konstrukční řešení na základě rozhodovací analýzy vybrána varianta adaptivního vakuového systému. Protože dostupné zdroje nepodávaly dostatek informací o této technologii, hlavně z hlediska granulátů, bylo rozhodnuto, že bude proveden experiment, při kterém bude zjištěno, jaké jsou možnosti využití adaptivního vakuového systému a co všechno má vliv na jeho funkci.

3.1. *Nástavec*

Začalo se výrobou nástavce pro upínání vaků, který má v sobě vyvrtané kanály pro vedení vakua. Kanál je na straně, která se připojuje ke zdroji vakua opatřen vnitřním závitem pro šroubení a na straně, kde dochází ke kontaktu s granulátem osazením. Do tohoto osazení byl umístěn filtrační papír ze skelných vláken a před něj vodoinstalatérské sítko (obr. 30). To svým pryžovým obvodem s přesahem pasuje do osazení a drží filtrační papír ve správné pozici. Navíc jej brání proti protržení velkými částicemi. Na vnější části nástavce je drážka, ve které při smontování drží o-kroužek. Nástavec je obrobek z duralu a je zobrazen na obrázcích 29. Jen pro představu, největší \varnothing je 60 mm.



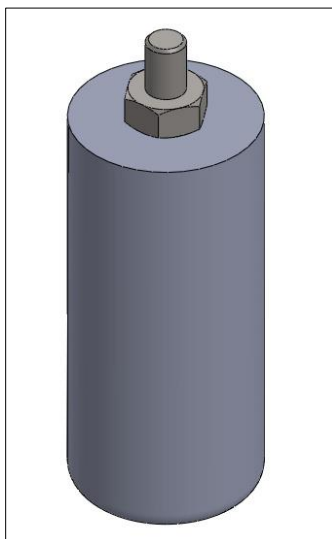
Obrázek 29 Nástavec s vyvrtanými kanály pro vakuum



Obrázek 30 Uspořádání filtru a mřížky v nástavci

3.2. *Latexové vaky*

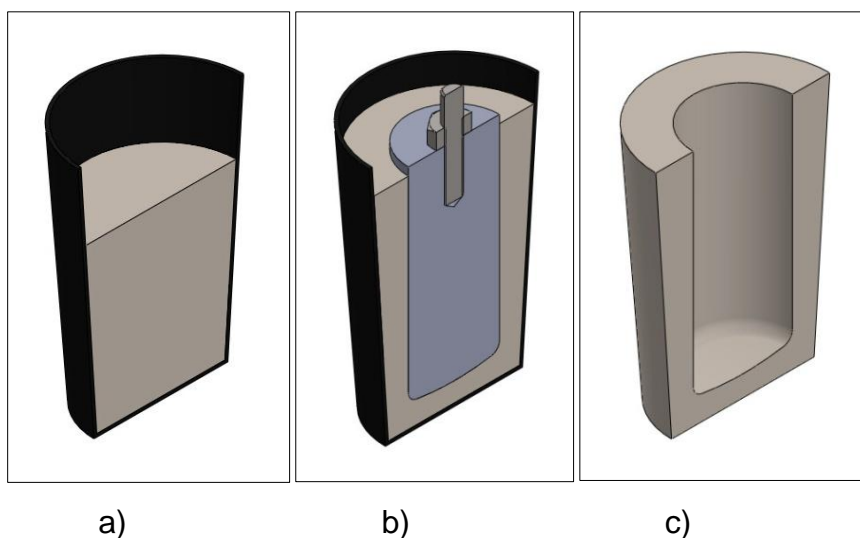
Další částí systému, kterou bylo nutné vyrobit, byl samotný vak. Jako materiál pro výrobu vaku byl zvolen přírodní latex. Jedná se o roztok přírodního kaučuku ve vodě obsahující amoniak. Tento polymer, v běžném stavu tekutý, reaguje se vzduchem a při styku s ním tvoří pevnou strukturu. Bylo určeno, že vak by měl mít průměr o několik mm menší než nástavec, aby byl uložen s přesahem a dotěsněn okroužkem. Pro výrobu vaků byl zhotoven z duralu leštěný trn průměru 57 mm a délky 130 mm se zaoblením na konci (obr. 31).



Obrázek 31 Trn pro výrobu vaků

První metodou bylo natírání latexu na povrch trnu štětcem. Postupně se nanese na trn 6 vrstev (vždy se muselo počkat, až dojde k vulkanizaci předchozí vrstvy). Touto metodou byl vyroben vak tloušťky 0,15 – 0,2. U této technologie se bylo dobře možné řídit výslednou tloušťku vaku počtem nátěrů. Tloušťka stěny vaku není příliš rovnoměrná kvůli působení vláken štětce při natírání, ale vyhovuje podmínkám rodícího se experimentu. Tímto způsobem byl tedy vyroben nejtenčí testovaný vak. Musel být při sundávání z trnu napudrován, aby se sám se sebou neslepil. Pudr je při výrobě vaků z latexu nezbytný.

Tlustší vaky byly vyrobeny odlišnou technologií. Jedná se o odlévání latexu do sádrových forem.



Obrázek 32 Postup výroby sádrové formy

Sádrová forma byla vyrobena podle obrázku 32, vše je pro názornost zobrazeno v řezu.

a) V licím kelímku byla namíchána modelářská sádra. Bylo nutné určit množství sádry tak, aby po ponoření trnu dosáhla požadované výšky a forma byla tedy dost vysoká.

b) Do rozmíchané sádry byl ponořen trn ve tvaru budoucího vaku. Poté následovalo posečkání zhruba 2 hodiny. Sádra mezitím ztuhla a bylo možné trn z formy vyjmout a formu vyjmout z licího kelímku.

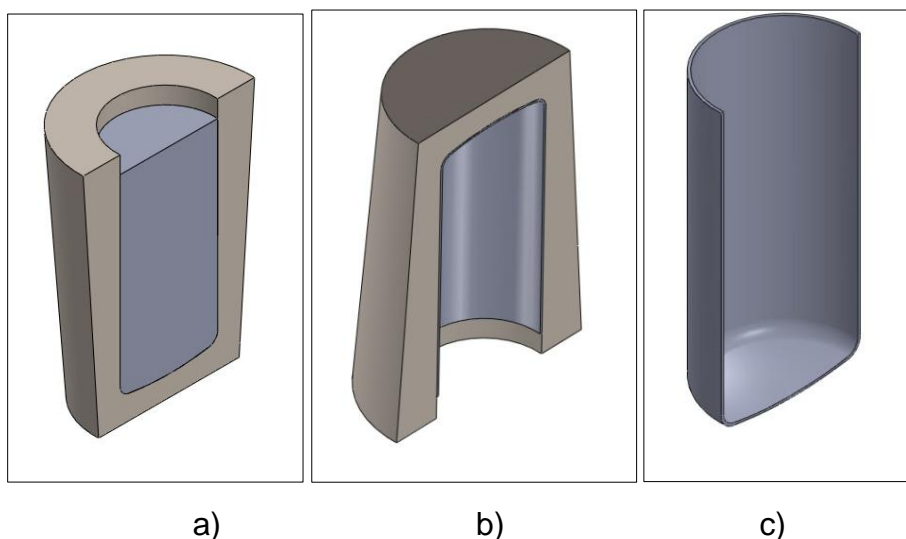
c) Formu bylo nutné nechat vyschnout cca 24 hodin.

Takto byly vyrobeny 3 formy a jedna z nich je na obrázku 33.



Obrázek 33 Forma pro odlévání vaků

Samotná výroba vaku probíhala podle obrázku 34



Obrázek 34 Odlévání latexu do sádrové formy

a) Do formy byl na určitou dobu (doba expozice) nalit latex. Díky prodyšnosti sádry začal latex na povrchu formy vlivem vzduchu vulkanizovat. Tloušťka stěny vaku při této technologii je dána právě dobou expozice. Ta se pohybovala v rozmezí 2 – 20 minut. Vaky byly zhotoveny v tloušťkách 0,25 – 0,7 mm. Tloušťka vaku není přímo úměrná době expozice. Při delších dobách expozice už nebyl nárůst tloušťky vaku s přírůstkem času takový, jako při kratších dobách.

b) Po přesně změřené době expozice byl latex vylit. Na stěnách a dně formy zbyla vrstva latexu. Po uplynutí doby potřebné k vulkanizaci a vyschnutí celého vaku byl vak už v podstatě hotový. Bylo to řádově několik hodin.

c) Vak byl napudrován a opatrně vyjmut a byly odstřiženy zbytky po nalévání a vylévání latexu. Vaky vyrobené touto technologií mají mnohem rovnoměrnější tloušťku stěny než technologií předchozí. Ze začátku byly problémy se vznikem bublinek ve vaku, které při zavedení vakua do vaku praskly, a vak byl nepoužitelný. Počet bublinek se nám povedlo snížit naléváním latexu do formy žlábkem a nakloněním formy při nalévání, tak aby latex stékal po její stěně a nevytvářel bublinky. Tak ve vaku zbylo jen několik bublinek a navíc tak malých, že se při zavedení vakua neprotrhly. Vaky jsou na obrázku 35.



Obrázek 35 Všechny vyrobené vaky

3.3. Granuláty

Granuláty se z hlediska mechaniky partikulárních látek dají popsat několika pro náš účel významnými vlastnostmi. Jedná se o velikost a tvar částic, tedy jedná-li se o částice kulového tvaru či částice obecně nepravidelného tvaru. Pro popis velikosti částic lze použít více metod. Vesměs je velikost částice vyjádřena jediným rozměrem, a to průměrem koule, mající se skutečnou částicí některou vlastnost společnou. Odchylka od skutečného tvaru je pak vyjádřena tvarovým součinitelem (tzv. ekvivalentní průměr). Jedním z nich je d_a - strana čtvercového oka v síti, jímž částice právě projde. Tento součinitel byl použit při popisu granulátů v předkládané práci. Tvar částic obecně nepravidelného tvaru se dá popisovat dvěma parametry

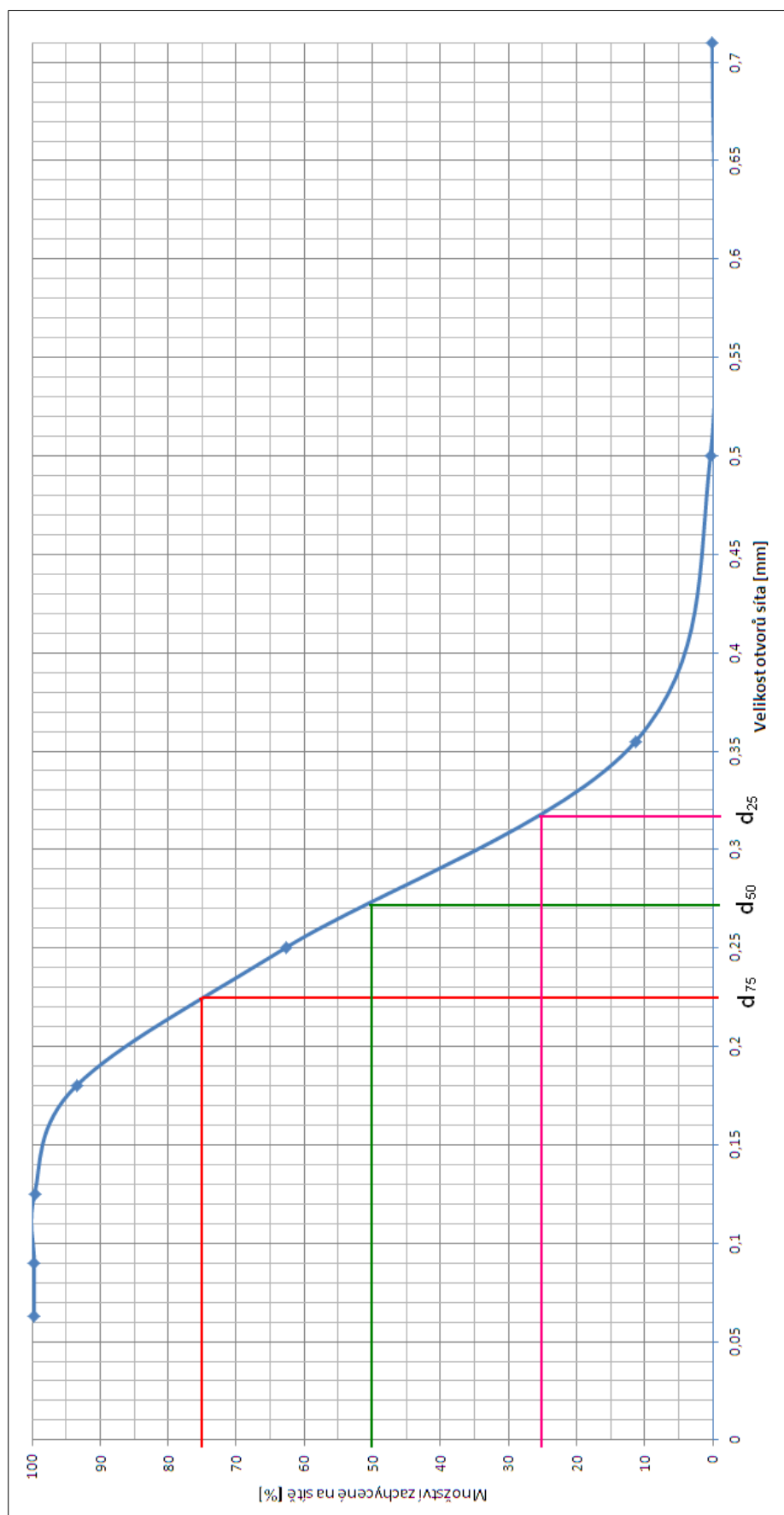
podlouhlostí a plochostí. K popisu četnosti výskytu zrn různých velikostí se používá křivek zrnitosti. Křivka zrnitosti je výsledek disperzního rozboru, který rozdělí vzorek partikulární látky do několika tříd podle velikosti zrn. Vyplývají z ní parametry d_{75} , d_{50} , d_{25} . Jedná se o myšlenou velikost ok síta, na kterých při síťovém rozboru zůstane 75%, 50% a 25% hmotnosti vzorku. Velikost středního zrna je označena d_{50} . Stupeň stejnoměrnosti se vypočte z následujícího vztahu a čím bližší je jeho hodnota k 1, tím stejnoměrnější jsou zrna.

$$s = \frac{d_{75}}{d_{25}}$$

Na obrázku 36 je součtová křivka zrnitosti sklářského písku, který byl v experimentech použit.

Z tohoto grafu: $d_{75} = 0,225 \text{ mm}$, $d_{50} = 0,272 \text{ mm}$, $d_{25} = 0,318 \text{ mm}$

$$s = \frac{d_{75}}{d_{25}} = \frac{0,225}{0,318} = 0,708$$



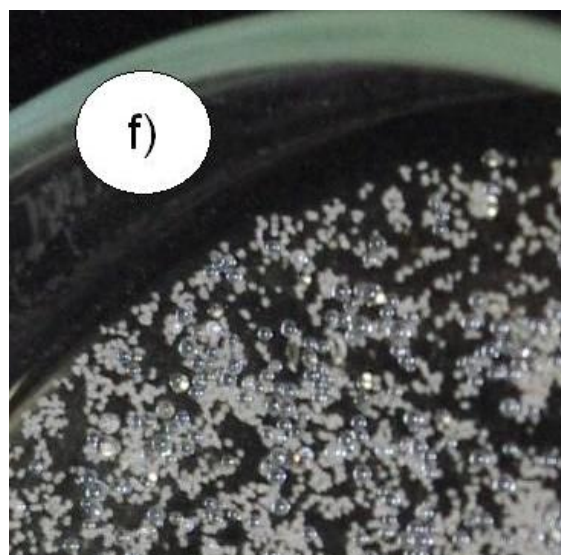
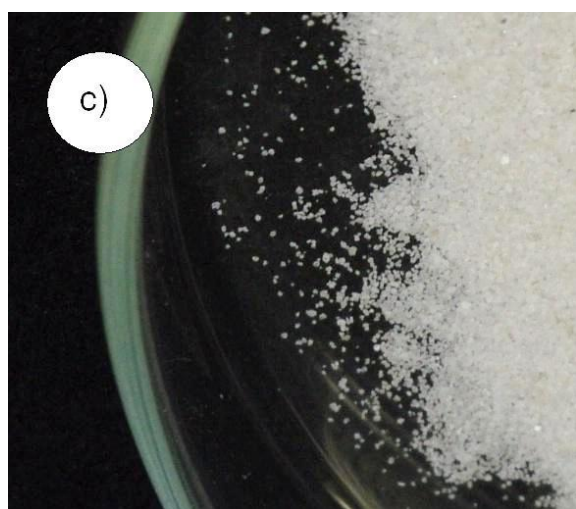
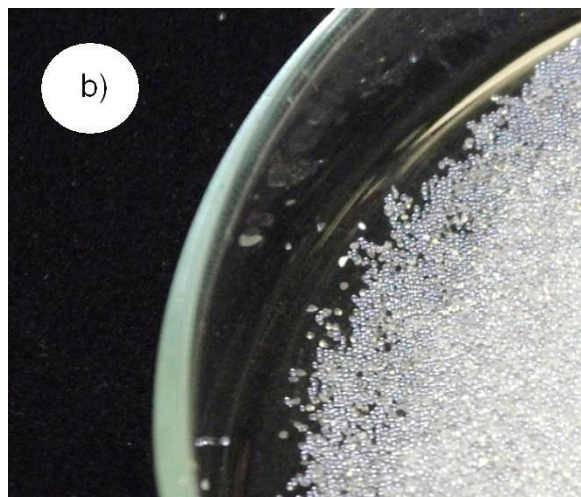
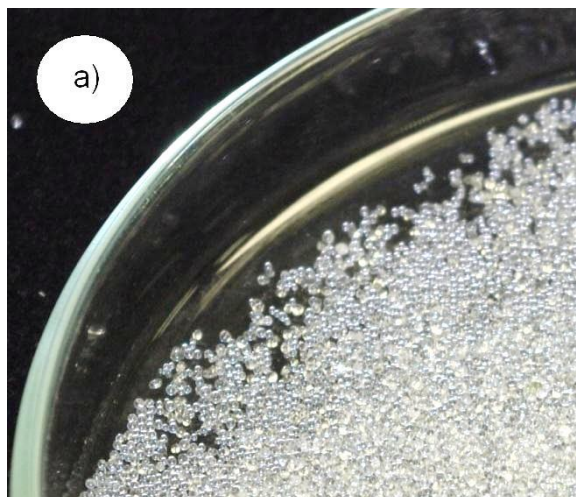
Obrázek 36 Graf součtové křivky zrnitosti sklářského písku

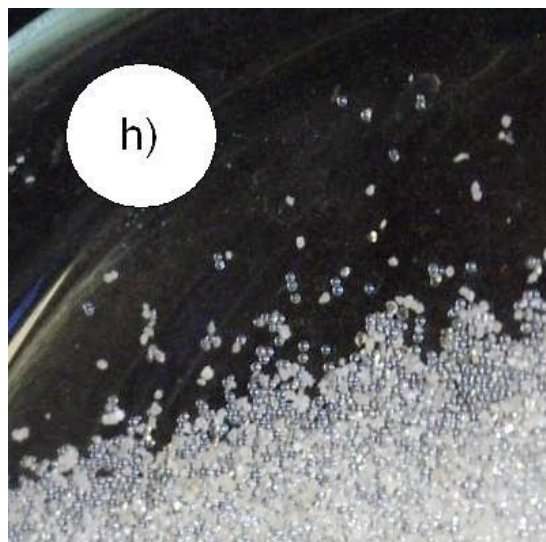
U zkoušeného sklářského písku byla rovněž změřena vlhkost. Vzorek cca 20 g byl vysoušen v sušičce vytápěné infračervenými lampami na 120°C, která jej zároveň vážila. Po 6 min už se jeho hmotnost přestala zmenšovat, tudíž byl vysušen a byl odečten hmotnostní podíl vody v písku 0,027%. Pro experimenty písek vysoušen nebyl, jelikož během experimentu byl do písku nasáván vzduch z atmosféry, a tak by nebylo možné zaručit stejnou vlhkost písku v průběhu testování.

Nejdůležitější vlastností granulátů, používaných pro adaptivní vakuový systém, je intergranulární tření. Je vyjádřeno buď součinitelem intergranulárního tření μ nebo přímo úhlem intergranulárního tření Φ_h [16].

$$\mu = \operatorname{tg} \Phi_h$$

Intergranulární tření vysvětluje, proč větší částice dosahovaly malých úchopných sil. Mezi částicemi mohou totiž vznikat tření kluzné a valivé. Odpor při kluzném tření se zmenší asi na 1/3, je-li umožněno tření valivé. Z pokusů, které zkoumaly vliv velikosti zrn křemene na intergranulární tření vyplývá, že se toto tření snižuje s narůstajícím průměrem zrn. To se dá vysvětlit tím, že velká zrna se snadněji valí. Existence kluzného tření není závislá na tvaru částic, ale je ovlivněna jejich drsností. Valivé tření je naopak umožněno izometrickými zrny a není ovlivněné drsností částic [16]. Při ohledávacím experimentu a testech, které mu předcházely, bylo otestováno poměrně velké množství granulátů, od plastových granulátů používaných pro dávkování při lisování plastů (izometrická zrna nadmilimetrové velikosti), přes některé sypké potraviny (kukuřičná krupice, mletá káva) až po sklářský písek a balotinu. Na obr. 37 je uvedeno několik granulátů, které se jeví jako perspektivní a většina z nich byla testována při experimentu.



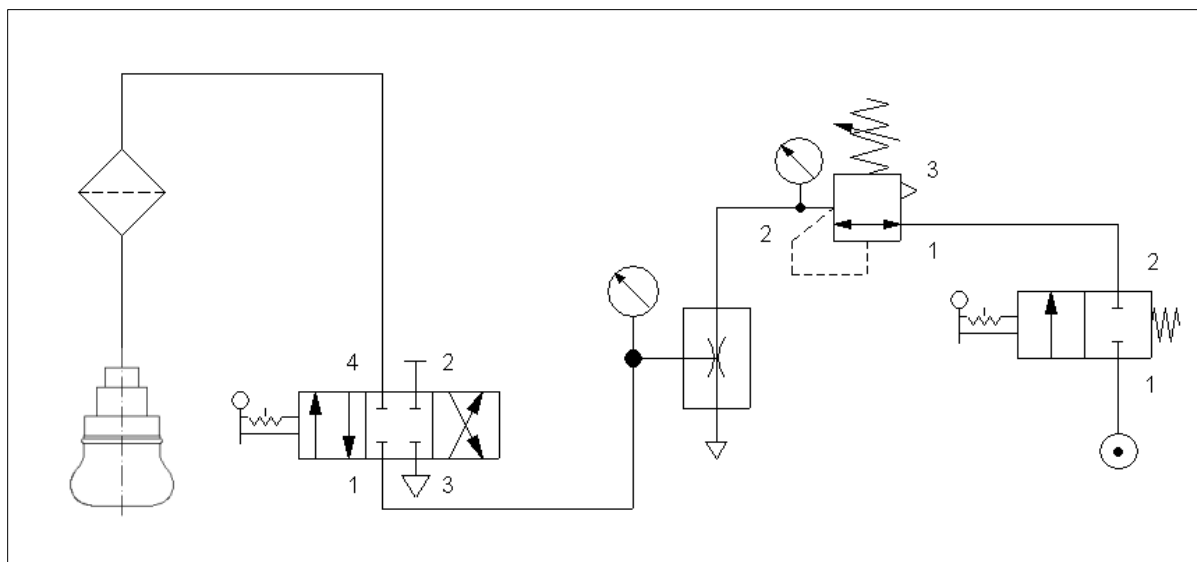


Obrázek 37 Granuláty

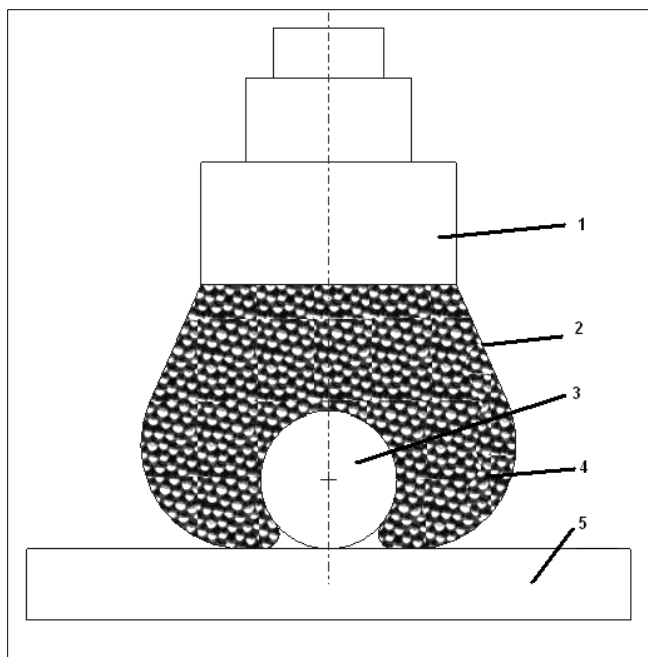
- | | | |
|----|---------------------------------------|---------------------|
| a) | Balotina 0,57 – 0,7 mm | (označení B7) |
| b) | Balotina 0,325 – 0,43 mm | (označení B9) |
| c) | Sklářský písek 0 – 0,6 mm | (označení P0-0,6) |
| d) | Sklářský písek 0 – 0,3 mm | (označení P0-0,3) |
| e) | Sklářský písek 0,3 – 0,6 mm | (označení P0,3-0,6) |
| f) | Směs P0,3-0,6 + B7 v hmot. poměru 1:1 | (označení S1) |
| g) | Směs P0-0,3 + B9 v hmot. poměru 1:2 | (označení S2) |
| h) | Směs P0,3-0,6 + B9 v hmot. poměru 1:4 | (označení S3) |
| i) | Mletá káva 0,3-0,6 mm | (označení KA) |

Bylo rozhodnuto, že pro zjištění optimálního granulátu, tloušťky vaku a úrovně vakua při uchopování bude proveden experiment. Nejprve bylo nutné provést experiment ohledávací, při kterém bylo možné zjistit, které z granulátů budou dosahovat nejlepších výsledků.

Pro tyto účely bylo sestrojeno testovací zařízení. Pneumatické schéma testovacího zařízení můžete vidět na obr. 38. Redukčním ventilem byl nastavován podtlak vytvářený ejektorem.



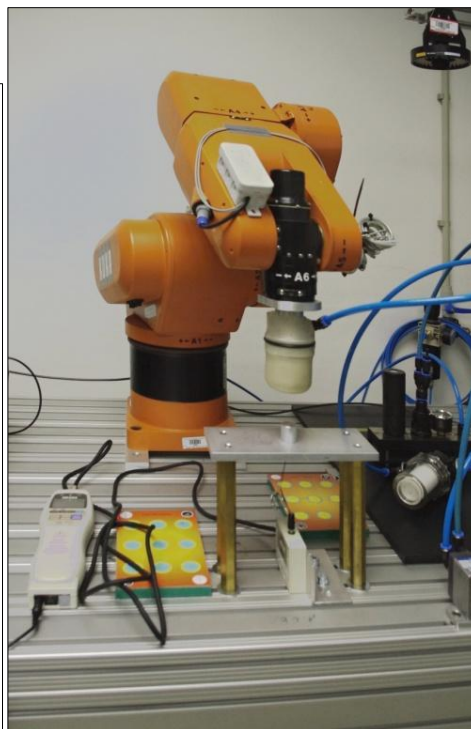
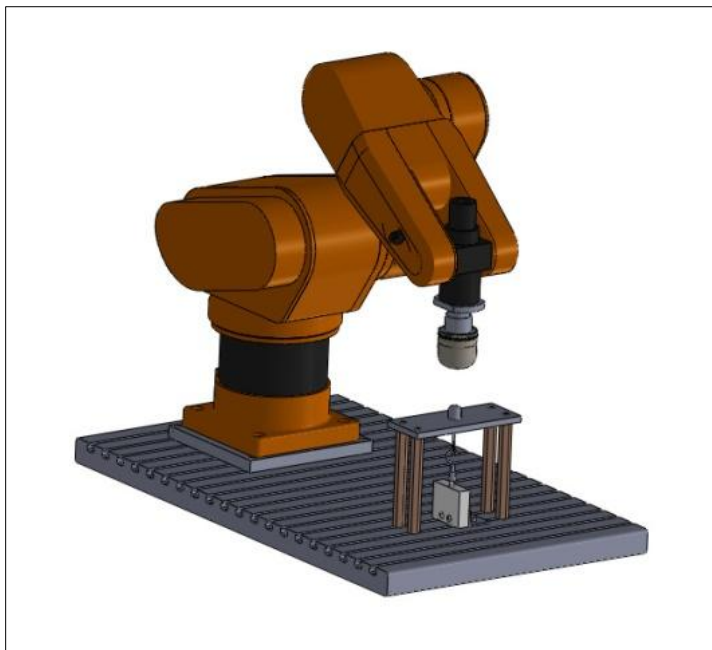
Výstupem z experimentu byla síla úchopu a síla odporu vyvinutá při najíždění na určité typy objektů. Na objekty bylo najížděno vakem s atmosférickým tlakem podle obrázku 39 ve směru osy nástavce (vak je v řezu).



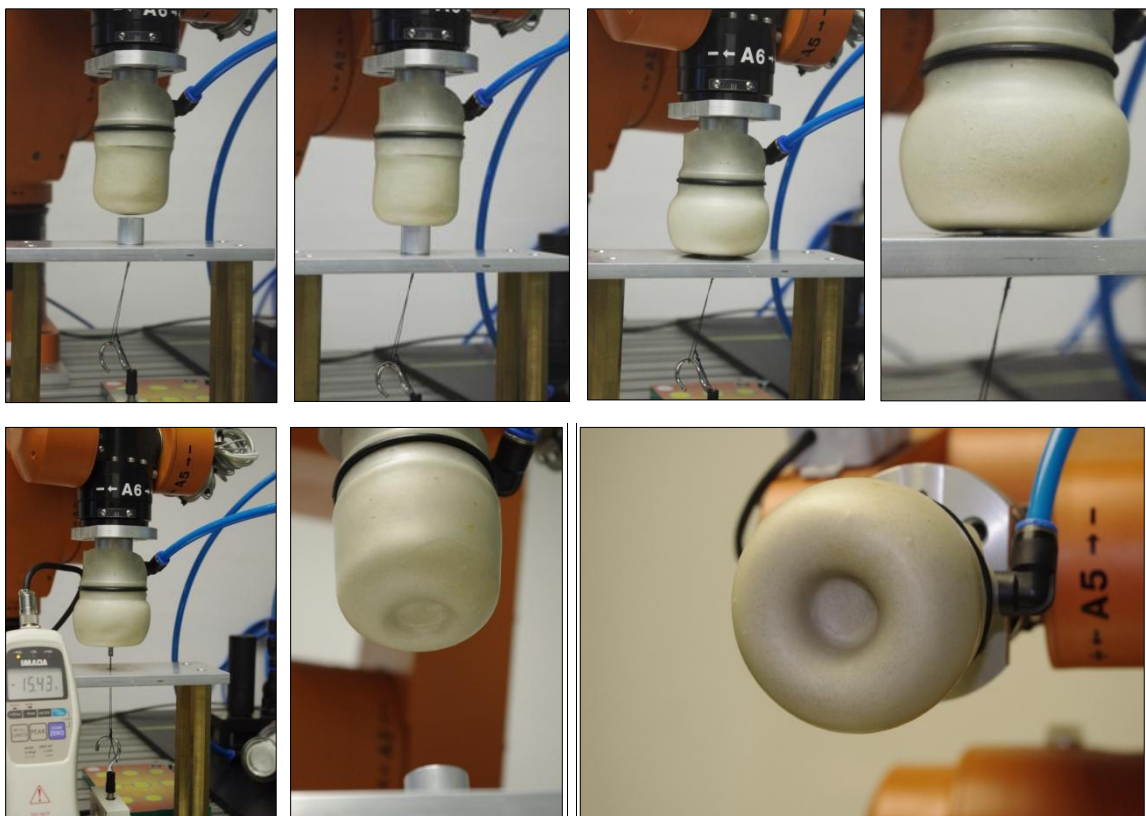
Obrázek 39 Úchopný prvek

1 - nástavec, 2 - vak, 3 - objekt, 4 - granulát, 5 - stůl

Po najetí byl vak evakuován a bylo odjížděno ve směru osy zpět. Objekt byl v ose připevněn k dynamometru nylonovým lankem skrze díru vyvrtanou ve stole. Dynamometr snímal největší sílu, jakou byl objekt tažen ve směru osy, než se vytrhl z uchopení. Tato úchopná síla je nazvána síla vytržení. Síla odporu proti najíždění byla snímána při najíždění na objekt mimo měřící zařízení na vážní plošině. Obrázek 40 ukazuje počítačový model a reálné provedení testovacího zařízení.



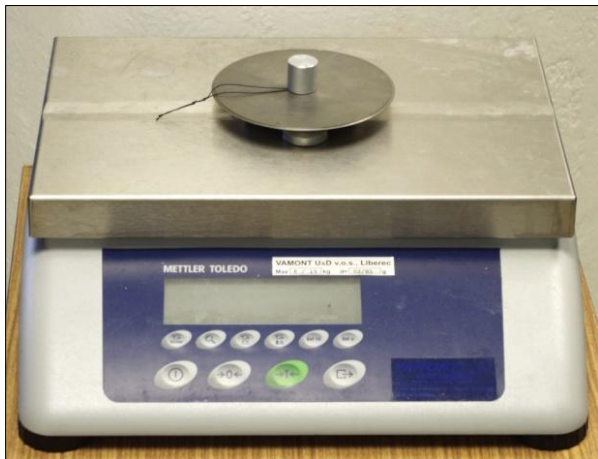
Obrázek 40 Testovací zařízení pro měření síly vytržení



Obrázek 41 Postup najíždění na objekt a měření síly vytržení

Na obrázku 41 jsou vidět jednotlivé fáze najíždění chapadla na objekt. Je zde patrná i přibližně milimetrová mezírka mezi vakem a stolem, na kterém je vak umístěn. Při najíždění do této pozice se dosahovalo největších úchopných sil a tento

fakt je více rozveden na straně 50 nahoře. Po najetí byl vak evakuován na předem dané hodnoty podtlaku – došlo k uchopení a bylo jím odjížděno vzhůru ve směru osy. Dynamometr zaznamenal nejvyšší hodnotu síly vytržení. Ve vaku zůstal přibližný negativ objektu, z čehož bylo možné usuzovat, jak dobře byl objekt obklopen.

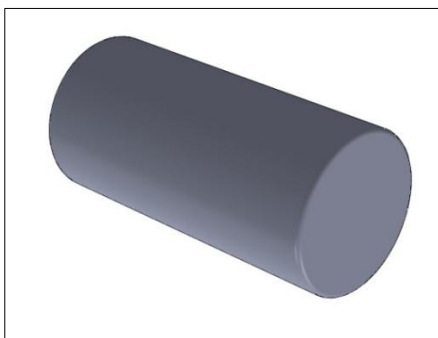


Obrázek 42 Měření síly odporu proti najíždění na vážní plošině

Do vaku byl při každém pokusu nasypán stejný objem granulátu, a to 125 ml. Testovaných objektů bylo celkem 5, po ohledávacím experimentu byl přidán objekt O6. Pro představu objekt O1 má průměr 20 mm. Výrobní dokumentace objektů je přiložena.



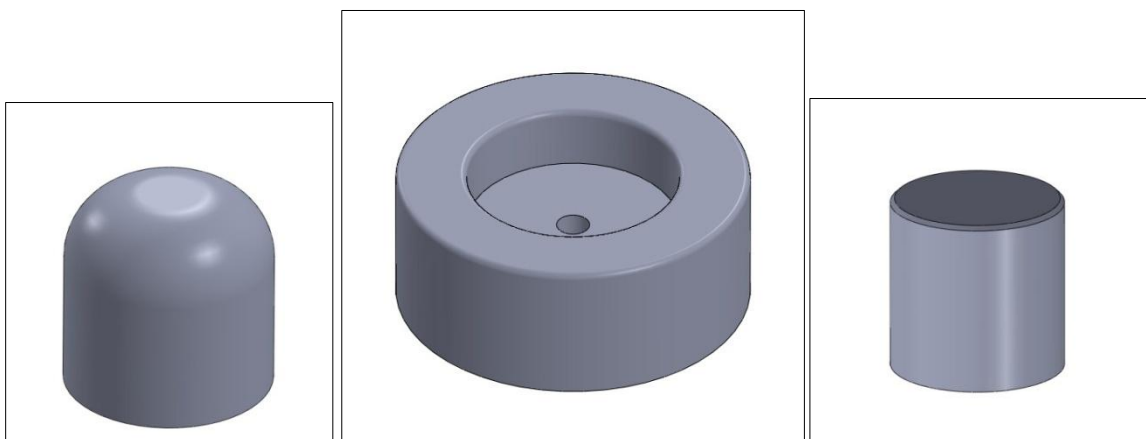
Objekt O1



Objekt O2



Objekt O3 byl uchopován pouze za válcovou část



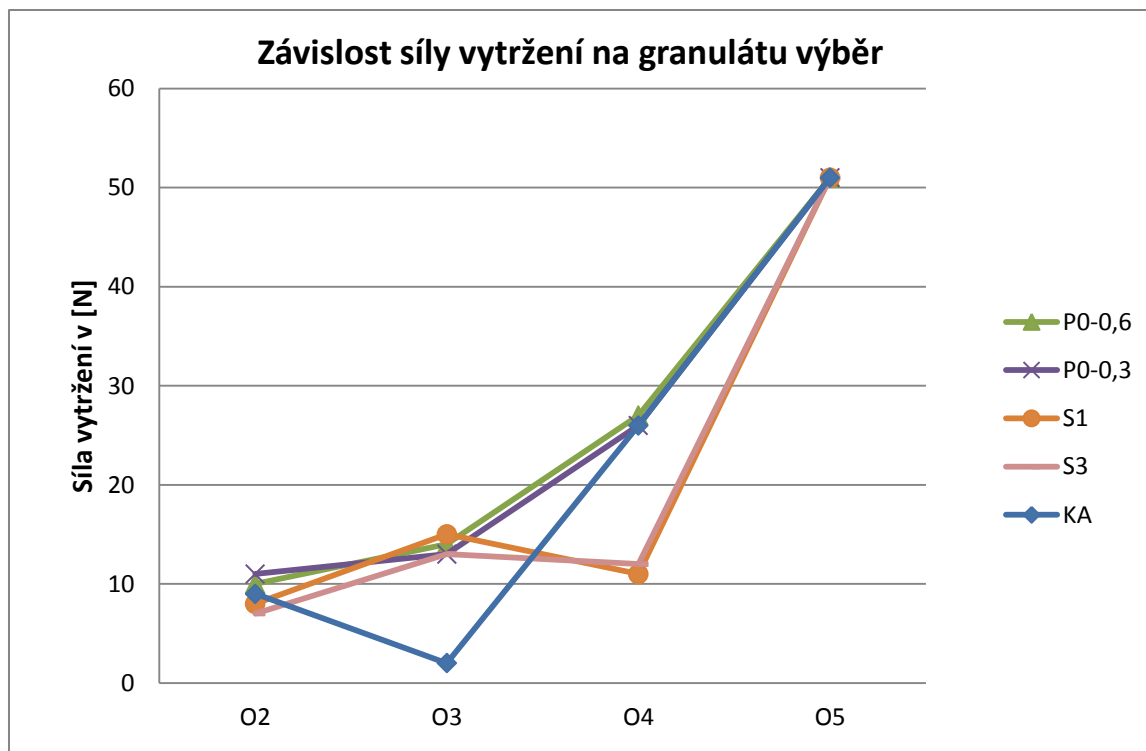
Objekt O4

Objekt O5

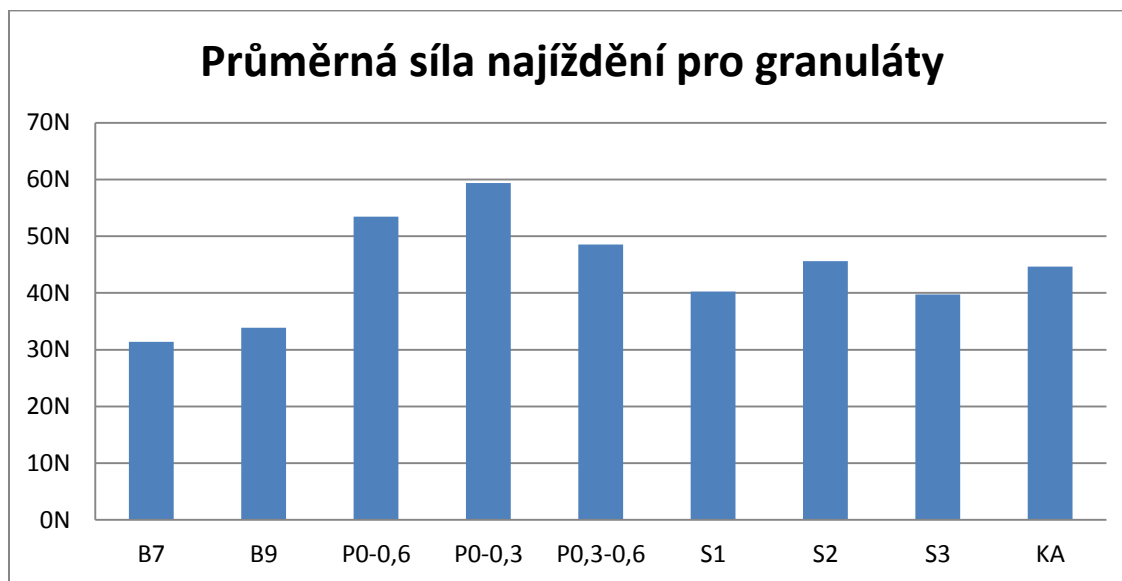
Objekt O6

Obrázek 43 Testované objekty

Při ohledávacím experimentu byla použita pouze jedna tloušťka vaku 0,5 mm a pro každý objekt jen jedna úroveň vakua 20% pro objekty O2 a O3 a 40% pro O4 a O5. Objekt O1 nebyl při ohledávacím experimentu použit, protože ho v mnoha případech nebylo vůbec možné uchopit. Písky vykazovaly díky nepravidelnosti svých zrn velké intergranulární tření, a tím pádem výrazně lepší vlastnosti při držení objektu. Na druhou stranu kladly velký odpor při najíždění, protože docházelo k upěchování. Balotina naopak vykazovala dobré vlastnosti při volném přeskupování, ale úchopné síly byly menší. Graf se silami odporu proti najíždění je na obr. 45 a jedná se o průměrné hodnoty při najíždění na O2 a O4. Proto byly vytvořeny směsi balotiny s pískem. U těchto směsí se skloubily dobré vlastnosti tečení balotiny při najíždění a velké intergranulární tření písku při úchopu. Výsledkem bylo několik grafů. Obr. 44 je graf granulátů, které měly nejlepší uchopovací síly – písku a směsí, které měly o něco nižší uchopovací síly.



Obrázek 44 Výsledný graf na ose x jsou objekty



Obrázek 45 průměrné síly při najíždění na objekty 02 a 04

B7	Balotina 0,57 – 0,7 mm
B9	Balotina 0,325 – 0,43 mm
P0-0,6	Sklářský písek 0 – 0,6 mm
P0-0,3	Sklářský písek 0 – 0,3 mm
P0,3-0,6	Sklářský písek 0,3 – 0,6 mm
S1	Směs P0,3-0,6 + B7 v hmot. poměru 1:1
S2	Směs P0-0,3 + B9 v hmot. poměru 1:2
S3	Směs P0,3-0,6 + B9 v hmot. poměru 1:4
KA	Mletá káva 0,3-0,6 mm

Tabulka 2 Zkrácená označení granulátů

Při ohledávacím experimentu vyšla najevo zajímavá skutečnost a to, že z hlediska míry najetí na uchopovaný objekt je nejvyšších úchopných sil dosaženo, zastaví-li se vak při prvním kontaktu se stolem, na kterém objekt leží nebo těsně před ním. Pokud vak nedojede až ke stolu, či případně bude-li najíždět dále i po kontaktu se stolem úchopná síla se zmenšuje. Tento poznatek je podložen ověřovacími experimenty pro 2 různé granuláty (P0-0,6 a S1), 3 tloušťky vaku a 4 objekty, proto ho můžeme pokládat za obecně platný.

4.2. Výsledek ohledávacího experimentu

Po tomto zjištění již bylo ve většině případů možné uchopit i objekt O1 a proto byl společně s objektem O2 zařazen do následujícího experimentu. Navíc bylo rozhodnuto, podle zkušenosti s objektem O5, že bude vyroben podobný objekt, ale menších rozměrů, který bude dávat měřitelné hodnoty a navíc bude velikostně srovnatelný s objekty O1 a O2, byl nazván O6 a je na obrázku 36. Ostatní objekty vykazovaly buď příliš malé či velké úchopné síly nebo byly svým tvarem podobné vybraným objektům.

Z granulátů byl vybrán jeden zástupce písků a jeden zástupce směsí S1 a P0-0,6. Porovnávat písky mezi sebou by bylo bezpředmětné, jelikož měly všechny téměř totožné výsledky při měření úchopné síly. Při posuzování granulátů byla brána v potaz síla vytržení a průměrná síla při najíždění s daným granulátem na objekty O2 a O4. Tato odporová síla má význam za prvé pro uchopování křehkých objektů, objektů s malou pevností, objektů s reologickými vlastnostmi, zkrátka takových, které by byly znehodnoceny či vůbec nebyly upnuty při velké najížděcí síle. Druhý význam této odporové síly je při uchopování, kde dochází k velkým přesunům granulátu ve vaku, a to hlavně ve směru kolmém na směr najíždění. Při najíždění na ploché

objekty se granuláty, které se chovají jako jednoparametrické [16], tedy se smykovou pevností přímo úměrnou normálnímu zatížení, upěchují a dále se již nepřetvářejí. Tento problém může nastat například, je-li najížděno na objekt ležící na velké ploše a je-li třeba objekt obklopit co nejbliž u této plochy. Pak se vlivem působení normálního zatížení od této plochy granulát upěchuje a k jeho dalšímu přesouvání směrem do stran by bylo zapotřebí obrovských sil.

4.3. Ortogonální experiment

Ortogonální experiment je využíván při tzv. Taguchiho přístupu k plánování experimentu. Jedná se o návrh a vyhodnocení experimentu standardizovaným postupem využívajícím tzv. ortogonálních matic. Ortogonální matice umožňuje odhadnout maximální počet efektů při minimálním počtu pokusů. Efekty jsou matematicky nezávisle odhadnuty. Při návrhu experimentů jsou faktory přiřazeny do ortogonální soustavy. Každý řádek v ortogonální soustavě reprezentuje podmínky pokusu, jsou na něm zapsány úrovně faktorů. Počet ° volnosti soustavy musí být větší než počet ° volnosti faktorů. Počet ° volnosti soustavy je počet pokusů - 1. Počet ° volnosti jednotlivých faktorů je počet úrovní - 1 a počet ° volnosti všech faktorů dohromady je jejich součet.

4.4. Cíl a struktura experimentu

Za cíl experimentu bylo stanoveno zjistit nejlepší kombinaci tloušťky vaku, úrovně vakua a granulátu pro uchopování objektů. Tzn., aby bylo dosaženo co nejvyšší úchopné síly (síly vytržení) a přijatelně malé síly odporu proti najíždění. Mluvě jazykem Taguchiho experimentu jsou tyto dvě síly charakteristiky jakosti a pro úchopnou sílu platí bigger is better, kdežto pro sílu odporu smaller is better. Bylo rozhodnuto, že budou testovány faktory podle tabulky 3 níže. Z toho vyplývá, že faktory byly 4, z toho 1 na 2 úrovních a 3 na 3 úrovních. Počet ° volnosti těchto faktorů je tedy $1 \cdot (2-1) + 3 \cdot (3-1) = 7$. Pro kombinaci jednoho dvouúrovňového a až sedmi tříúrovňových je doporučována matice L-18 tzn. 18 pokusů, 17 ° volnosti. Matici L-18 můžeme vidět v tabulce 4. Tabulka obsahuje naměřené hodnoty síly vytržení (Síla) a síly odporu (Odpor). [15]

Faktory:		Hodnoty	Jednotky
X1	Granulát	P0-0,6	-
		S1	
X2	Vak	0,2	mm
		0,42	
		0,65	
X3	Podtlak	20	%
		40	
		60	
X4	Objekt	O2	
		O1	
		O6	

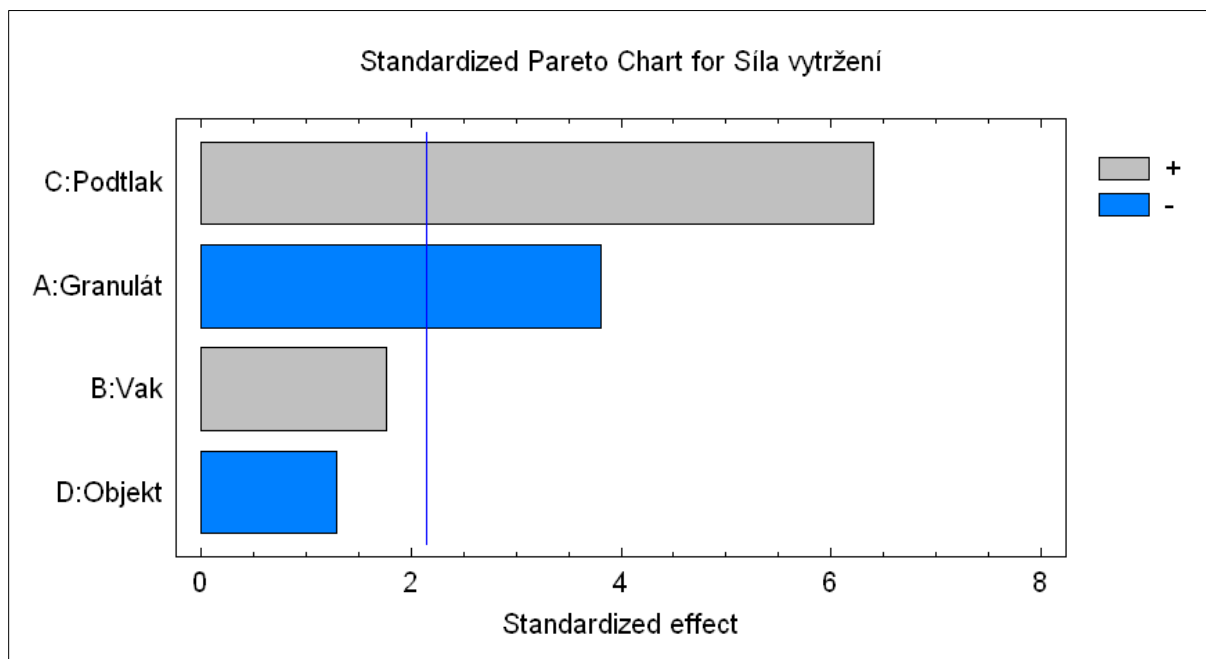
Tabulka 3 Hodnoty hladin faktorů

Pokus	X1	X2	X3	X4	Síla [N]	Odpor [N]
1	1	1	1	1	14,5	19,6
2	1	2	2	2	16,3	20,6
3	1	3	3	3	42,0	53,0
4	1	1	1	2	8,0	15,7
5	1	2	2	3	24,3	37,3
6	1	3	3	1	42,0	35,3
7	1	1	2	1	29,0	21,6
8	1	2	3	2	31,0	23,5
9	1	3	1	3	13,3	44,1
10	2	1	3	3	20,0	16,7
11	2	2	1	1	11,7	27,5
12	2	3	2	2	10,0	29,4
13	2	1	2	3	18,3	25,5
14	2	2	3	1	30,0	23,5
15	2	3	1	2	2,0	26,5
16	2	1	3	2	14,0	9,8
17	2	2	1	3	8,7	28,4
18	2	3	2	1	24,0	31,4

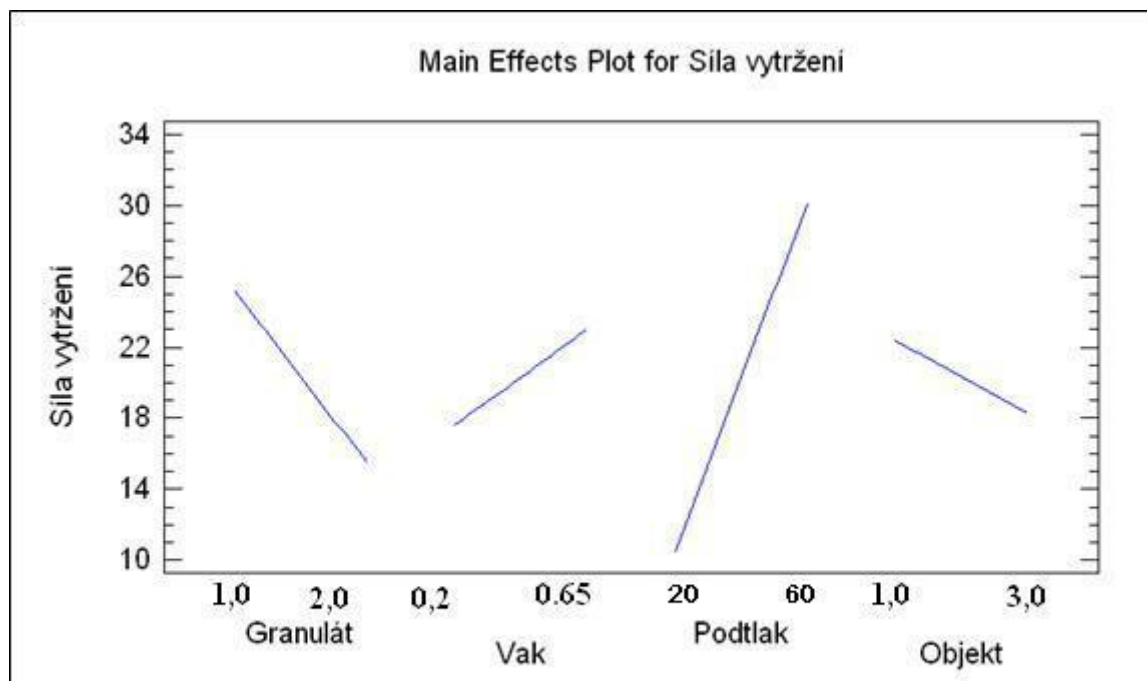
Tabulka 4 Uspořádání experimentu do ortogonální matice L-18

4.5. Vyhodnocení experimentu

Při vyhodnocení experimentu bylo potřeba zjistit relativní podíl jednotlivých faktorů, a které hladiny těchto faktorů dosahují nejlepších výsledků. Experiment byl vyhodnocen pomocí statistického programu STATGRAPHIX Centurion metodou ANOVA. Výstupem je standardizovaný Paretův diagram (obr. 46), kde jsou znázorněny vlivy jednotlivých faktorů. Znaménko (+) znamená, že kladný přírůstek faktoru má pozitivní vliv na odezvu a naopak znaménko (-) znamená, že přírůstek faktoru má negativní vliv na odezvu. V Paretově diagramu velikost jednotlivých faktorů představuje jejich význam (vliv na odezvu), přičemž u standardizovaných diagramů je velikost významu faktoru dána poměrem účinku faktoru a standardní chyby. Svislá modrá čára je statistická hladina významnosti a byla použita hodnota 5%. Výsledky nad hladinou významnosti jsou jednoznačně statisticky významné. Druhým výstupem je graf hlavních účinků faktorů (obr. 47), kde vidíme průběhy síly vytržení v závislosti na změnách jednotlivých faktorů. Na dalších dvou grafech (obr. 48, 49) je provedena stejná analýza pro odporovou sílu proti najíždění [15], [17], [19].



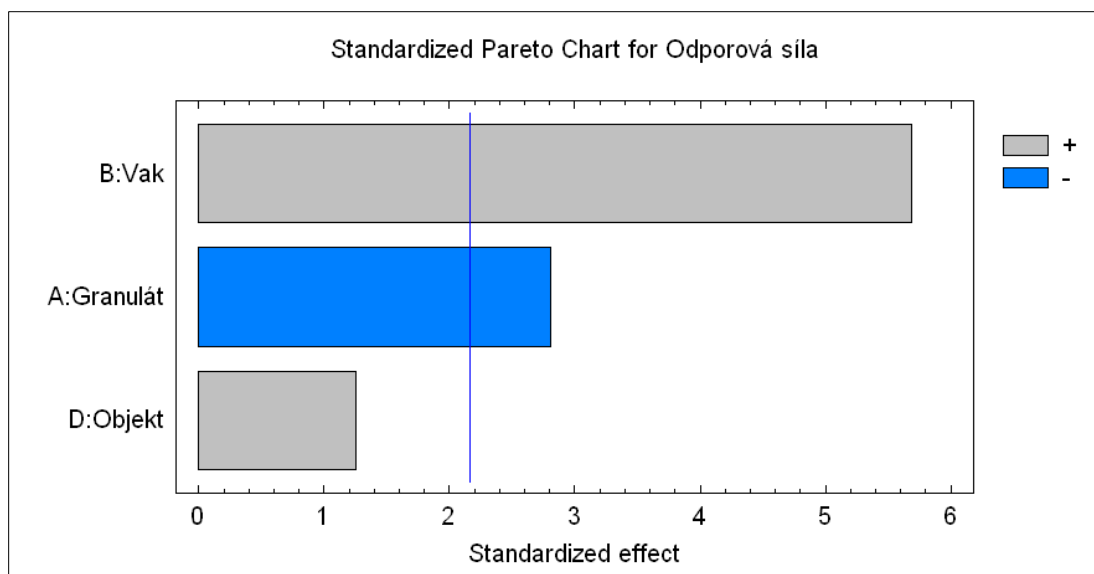
Obrázek 46 Standardizovaný Paretův diagram pro sílu vytržení



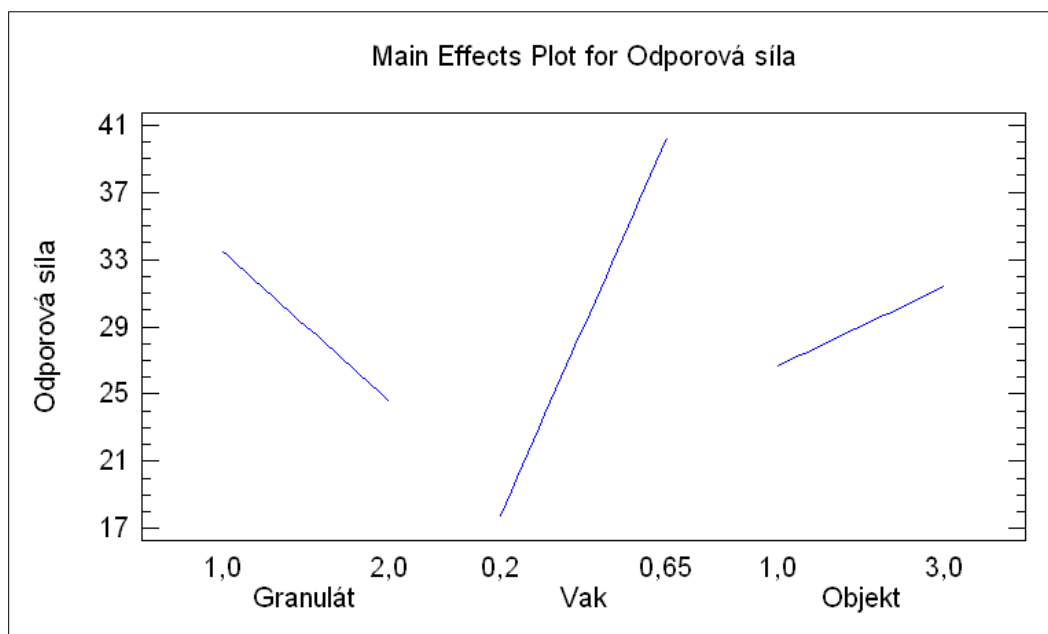
Obrázek 47 Graf hlavních efektů pro sílu vytržení

Při zhodnocení prezentovaných výsledků experimentu tedy vyplne, že na úchopnou sílu mají jednoznačně vliv faktory podtlak a granulát. Podtlak má vliv větší. Lze také jednoznačně říct, že zvyšováním podtlaku dochází ke zvyšování úchopné síly. Protože granulát není metrologický faktor, můžeme pouze konstatovat, že při porovnání bylo výrazně lepších výsledků dosaženo s granulátem P0-0,6 tedy polyfrakčním sklářským pískem oproti granulátu S1 (směs P0,3-0,6 + B7 v hmot. poměru 1:1) Zkratky viz tabulka 2 na str. 47.

Příznivý vliv podtlaku na úchopnou sílu se dá vysvětlit zvýšením třecích sil mezi zrny granulátu. Pro přesun zrn, který doprovází vytržení objektu z úchopu, je potřeba větší síla – úchopná síla. Vliv granulátu rozeberu na následující stránce při srovnání obou experimentů.



Obrázek 48 Standardizovaný Paretův diagram pro odporovou sílu



Obrázek 49 Graf hlavních efektů pro odporovou sílu

Odporová síla je odezva typu čím menší tím lepší. Pro odporovou sílu lze říci, že na ní jednoznačně mají vliv faktory tloušťka vaku a granulát. Tloušťka vaku má větší vliv. Odporová síla je tím větší, čím tlustší vak je použit. Granuláty byly opět jen porovnány, kvůli tomu, že granulát není metrologický faktor. Granulát S1 dosahoval výrazně lepších výsledků než sklářský písek.

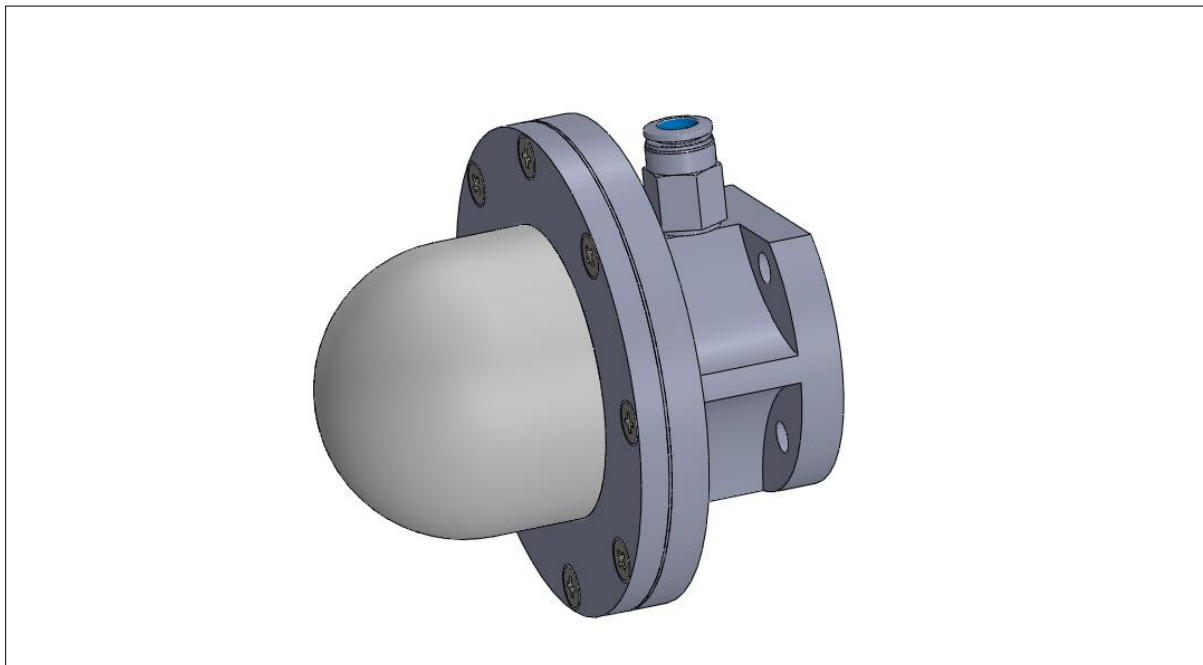
Při najíždění na objekt dochází k elastické deformaci vaku. Nastává zde trojosá napjatost. Z hlediska odporové síly proti najíždění ale není tlakové zatížení vaku ve směru najíždění významné. Proto můžeme model zjednodušit na dvojso

tahovou napjatost. Zvýší-li se tloušťka vaku, naroste i průřez, na kterém toto napětí působí a tím pádem i vznikající odporová síla.

Srovnáme-li výsledky obou experimentů, zjistíme, že faktor prokazatelně ovlivňující obě síly je granulát. Přidáním balotiny do sklářského písku klesne jeho intergranulární tření. Směs má tedy lepší vlastnosti tečení, a to jak za atmosférického tlaku (najíždění), tak bohužel i v evakuovaném stavu (úchop). Pro písek, jakožto partikulární látku, s plochým nekulovým tvarem zrn, je typické kluzné tření. Tento typ tření není totiž vázán na tvar zrn, a záleží na jejich drsnosti. Pro balotinu, mající izometrická zrna je naopak typickým tření valivé. U valivého tření hraje zanedbatelnou úlohu drsnost částic, záleží na jejich tvaru. Kulový tvar zaručuje tření nejmenší. Odpor kluzného tření klesne asi na 1/3 je-li umožněno tření valivé [16].

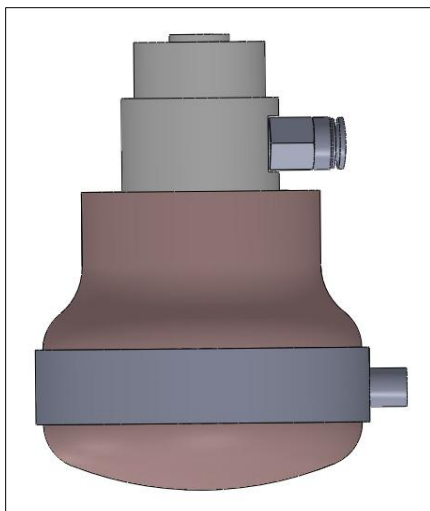
4.6. *Návrh chapadla na základě experimentu*

Na základě experimentu bylo navrženo chapadlo na obr. 50. Chapadlo je osazeno vakem průměru 60 mm. Je zde užito jiného principu upevnění vaku. Místo o-kroužku, jako v minulém řešení, je zde vak stisknut mezi přírubou a přídržným kroužkem. Aby vak nebyl pod příliš vysokým tlakem, což by negativně ovlivnilo jeho životnost, je mezi přírubou a přídržným kroužkem umístěn distanční kroužek. Poměr tloušťky upínací části vaku a distančního kroužku určuje přesah s jakým je vak upnut. Chapadlo je naplněno směsí balotiny a sklářského písku. V příloze je výrobní dokumentace tohoto chapadla.



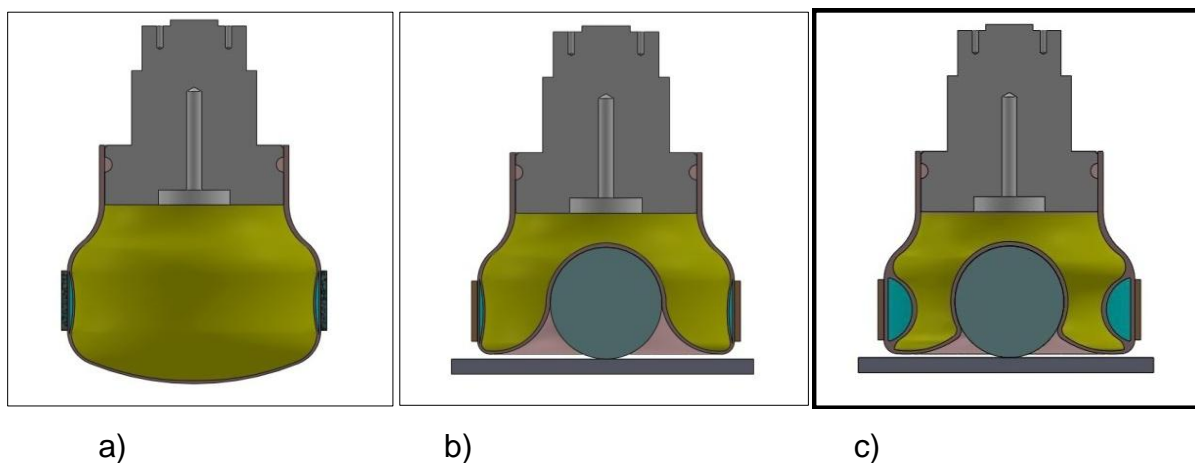
Obrázek 50 Chapadlo s vakem připevněným pomocí příruby

K ještě lepšímu úchopu nepravidelných součástí různých tvarů by došlo, kdyby vak bylo možné k nim dotlačit i z boku. Pro tento účel je navržen koncept chapadla na obrázku 51. Toto chapadlo je opásáno prstencem z plastu či textílie, který se nemůže natahovat. Vak chapadla má uvnitř dvě komory. Jedna je naplněna granulátem a druhá je prázdná. Do prázdné komory je připojen zdroj stlačeného vzduchu. Protože z výrobního hlediska by byl dvoukomorový vak velmi složitý, bylo by možné ho zhotovit slepením dvou vaků dohromady tak, aby se dosáhlo požadovaného tvaru.



Obrázek 51 Dvoukomorové adaptivní chapadlo

Na obrázku 52 je vidět řez chapadlem. Komora, do které je přiváděn stlačený vzduch, je modrá a komora naplněná granulátem je žlutá.



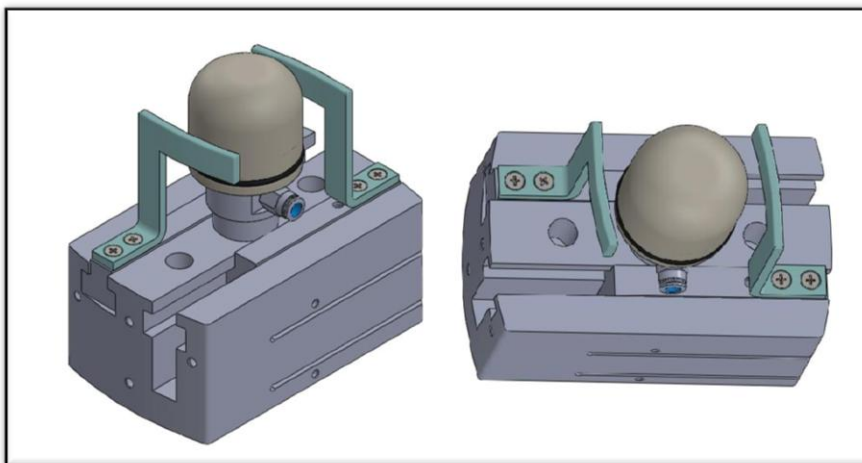
Obrázek 52 Princip dvoukomorového vaku

- Vak je připraven k použití, komora s granulátem má v sobě atmosférický tlak a vzduchová komora také. Vzduchová komora je vlivem tlaku granulátu, který napíná vak stlačena jen na nepatrnou skulinku.
- Je najeto na objekt ve směru osy chapadla. Objekt je obklopen, ale jen ve směru, ve kterém na něj bylo najeto. Z provedených experimentů vyplynulo, že obklopení ze stran pod největším průřezem objektu při pohledu v ose najíždění bývá jen velmi malé. To samozřejmě snižuje úchopnou sílu. Obě komory mají stále atmosférický tlak.
- Do vzduchové komory je přiveden tlakový vzduch. Ten působí z boku na granulát a tlačí ho směrem k součásti. Granulát stále za atmosférického tlaku přesouvá směrem k objektu a obklopuje jej i pod jeho největším průřezem. Po

obklopení následuje evakuování komory s granulátem. Jakmile je granulát k sobě vázán třecími silami již není nutné aby byla vzduchová komora pod tlakem. Nyní je možné s objektem manipulovat.

Dvoukomorový pneumatický vak má ovšem nevýhodu v tom, že je možné uchopovat jen součásti menší než je poloměr prstence.

Pro podlouhlé objekty je navrženo chapadlo na obr 53, které k dotlačení granulátu na objekt z boku využívá úchopných prvků chapadla. Nástavec s vakem je namontován na chapadlo firmy Festo. Úchopné prvky jsou tvarem přizpůsobeny vaku.



Obrázek 53 Chapadlo s mechanickým dotlačením [3]

5. Zhodnocení přínosu

Práce měla za cíl navrhnout na základě rešerše a testování poddajný úchopný prvek, který se dokáže svým tvarem přiměřeně přizpůsobit povrchu uchopovaných objektů. Tento úchopný prvek má být možné adaptovat na komerčně dodávaná chapadla různých typů.

Experimentální část práce přinesla množství nových poznatků na poli použití adaptivního vakuového systému. Bylo zjištěno, které faktory ovlivňují proces adaptace při uchopování a úchopnou sílu. Také byly zjištěny nejlepší úrovně těchto faktorů pro uchopování a držení. Důležitým momentem bylo také stanovení, jak hodně má být na objekty najeto pro dosažení nejlepší úchopné síly.

Získané poznatky byly využity při konstrukci poddajného chapadla. Toto chapadlo dokáže manipulovat s objekty různých tvarů, limitní je pro něj jejich velikost, protože vak s granulátem musí ve většině případů být větší než objekt. Užití toto chapadlo nalezne tam, kde je potřeba jedním chapadlem manipulovat mnoha různými objekty. Také je užitečné při manipulaci s jedním druhem objektu uchopovaným v různých pozicích bez možnosti obrazové analýzy. Další oblastí užití je při manipulaci s křehkými a málo pevnými objekty, které by byly stiskem běžných chapadel poškozeny. Tvarový úchop poddajného chapadla zajišťuje působení jen malých sil na objekt v porovnání s konvenčními chapadly.

Ekonomické přínosy chapadla se různí od aplikace, na kterou by chapadlo bylo použito. Zatímco při manipulaci s různými objekty má chapadlo význam v úspoře času na výměnu chapadla, při manipulaci s křehkými materiály se úspora projeví ve snížení zmetkovitosti či v možnosti automatizovat ruční manipulaci.

Závěr

Bakalářská práce je věnována výzkumu a návrhu poddajných úchopných prvků. V souladu se zadáním byl v první kapitole proveden rozbor současného stavu dané problematiky. Při posuzování jednotlivých technologií byla brána v úvahu i jejich možnost použití za vysokých teplot, kvůli možné aplikaci ve sklářském průmyslu.

V druhé kapitole byla z rešeršních podkladů vybrána dvě řešení. Rozhodovací analýzou byl pro konstrukční řešení vybrán adaptivní vakuový systém. Druhým řešením byly magnetoreologické a elektoreologické kapaliny. Hlavními důvody, proč toto zajímavé řešení nebylo vybráno k hlubšímu prozkoumání, jsou jeho technologická náročnost, cena a nedostupnost znalostí o technologii. Rozhodně tato technologie stojí za prozkoumání ve vztahu k poddajnému uchopování.

Třetí kapitola podává zprávu o výrobě zařízení pro testy adaptivního vakuového systému. Asi největším „oříškem“ bylo zvládnutí technologie výroby latexových vaků. Běžně dostupné pryžové vaky nebyly pro experiment vhodné. Latexové vaky byly nakonec vyráběny dvěma metodami. První je odlévání latexu do sádrových forem a druhou je natírání latexu na duralový leštěný trn.

Testy různých granulátů a vaků při uchopování objektů základních tvarů jsou zaznamenány ve čtvrté kapitole. Byl proveden ortogonální experiment se statistickým vyhodnocením. Jeho výsledky posloužily jako podklad ke konstrukci chapadla a návrhům nových uspořádání chapadel. Mezi granuláty figuroval i sklářský písek. K popisu použitého sklářského písku bylo nutné udělat síťový rozbor a změřit jeho vlhkost.

6. Literatura

- [1] Palko, A. – Smrček, J.: Robotika Koncové efekty pro priemyselné a servisné roboty, Košice 2004
- [2] Novotný, F.: Chapadla pro roboty a automatickou manipulaci, TU v Liberci 2009.
- [3] *Festo, internetová prezentace firmy* [online]. 2000 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <www.festo.cz>.
- [4] *SMC katalog výrobků* [online]. 2003 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <<http://2009.oc.smc-cee.com/cz/subcatalog.asp?catalog=482&subcatalog=495>>.
- [5] *Techno Sommer catalog* [online]. 2011 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.techno-sommer.com/H925/H925Cat.htm#S1>>.
- [6] *Schunk gripping modules catalog* [online]. 2011 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <http://www.schunk.com/schunk/schunk_websites/products/products_level_3/product_level3.html?product_level_3=8012&product_level_2=250&product_level_1=244&country=INT&lngCode=EN&lngCode2=EN>.
- [7] *PNAS* [online]. 2011 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.pnas.org/content/107/44/18809.full>>.
- [8] *IEEE Xplore* [online]. 2011 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=99979>>.
- [9] *Grupo Kopar Catalog* [online]. 2009 [cit. 2011-11-16]. Dostupné z WWW: <http://www.kopar.com.mx/catalogos/VMECA_V-Grip_System.pdf>.
- [10] NOVOTNÝ, František. Pružný úchopný prvek chapadla, zejména manipulátorů a robotů. *Rešeršní databáze patentů a užitných vzorů* [online]. 1992, 7 [cit. 2012-01-31]. Dostupné z: <http://isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pts.det?xprim=43017&lan=cs>
- [11] CIPOLLA, Thomas. *Adaptive gripping device* [patent]. US. Patent, 4,572,564. Uděleno 25.2.1986.
- [12] MONKMAN, Gareth, Stefan HESSE, Ralf STEINMANN a Henrik SCHUNK. *Robot Grippers*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. ISBN 978-3-527-40619-7.
- [13] *Electroadhesion for Industrial, Biomedical, Military, and Consumer Applications. SRI International* [online]. 07/2010 [cit. 2012-02-06]. Dostupné z: http://www.sri.com/robotics/documents/Electroadhesion_4pg.pdf
- [14] MATERIAL TESTING OF SHAPE MEMORY POLYMERS FOR MODULAR ROBOTICS APPLICATIONS AND DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE SMP GRIPPER FOR mini-PR2 ROBOT [online]. [2010] [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: <http://www.es.eupenn.edu/sunfest/documents/SmithJennifer10.pdf>. North Carolina State University.
- [15] BELAVENDRAM, Nicolo Quality by design Taguchi Techniques for Industrial Experimentation
- [16] FEDA, Jaroslav Základy mechaniky partikulárních látek, Academia Praha 1977
- [17] Design of experiments via taguchi methods: orthogonal arrays. *University of Michigan Chemical Engineering Process Dynamics and Controls Open Textbook*

- [online]. 2006, 27.11.2007 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Design_of_experiments_via_taguchi_methods:_orthogonal_arrays
- [18] RONG, Y., X. TANG a R. TAO. Flexible Fixturing with Phase-Change Materials.: Part 1. Experimental Study on Magnetorheological Fluids. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY* [online]. 2000, č. 11 [cit. 2012-03-23]. DOI: 10.1007/s001700070016. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/f3rxbbtgu7u08b33/>
- [19] NOVOTNÝ, Radovan. Optimalizace technologického procesu s využitím techniky DOE. *Q magazín*. 2003, č. 6, s. 8. ISSN 1213-0451.
- [20] NOVÁČEK, Vladislav. *Technologie výroby magnetoreologických kapalin*. Brno, 2009. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13980.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. JAKUB ROUPEC.